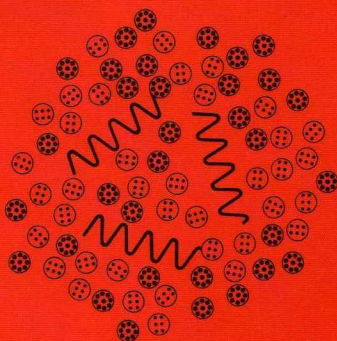
GORDON KANE
IL GIARDINO DELLE PARTICELLE
COME E PERCHÉ
LA FISICA DELLE PARTICELLE
STA CAMBIANDO
IL NOSTRO MODO
DI CONCEPIRE L'UNIVERSO
LA LENTE DI GALILEO
LONGANESI & C.

« La comprensione dei quark e dei leptoni non ci permetterà di dedurre che esisterà un giardino fiorito o che esisteremo noi stessi. I botanici comprendono i fiori in stretto rapporto col processo di fotosintesi che fornisce energia alla crescita sotto forma di sostanze chimiche che assorbono alcuni colori della luce e via dicendo. Ma perché ha luogo la fotosintesi e perché vengono assorbiti quei colori e non altri? I chimici e i fisici rispondono che ciò avviene a causa di certe proprietà degli atomi. Ma perché gli atomi hanno tali proprietà? Perché sono sistemi di elettroni legati a nuclei dalla forza elettromagnetica. Ma che cosa sono i nuclei? Perché la forza elettromagnetica ha la forma che ha? Quale che possa essere l'esito finale della ricerca per comprendere i fiori in questo modo, in aggiunta a quello in cui lo comprendono i poeti, le particelle e la loro teoria sono vicine alla fine della storia. Le particelle sono i semi di quel giardino che è il nostro mondo. »

Sebbene l'idea secondo cui gli « oggetti » intorno a noi – le case, gli alberi, gli animali e persino l'arcobaleno – sono composti da particelle piccolissime sia molto antica, essa ha dovuto passare al vaglio di innumerevoli scienziati (da Newton a Rutherford, da Boltzmann a Feynman) per raggiungere quel grado di « concretezza » che le attribuiamo oggi. La semplice nozione di atomo dell'inizio del nostro secolo – quella di un sistema solare in miniatura formato da un nucleo centrale circondato da elettroni orbitanti – è stata infatti ormai soppiantata da un quadro assai più variegato e complesso, e le varie decine di particelle oggi note compongono quello che alcuni hanno chiamato uno « zoo » e che l'autore di questo libro, usando un'altra metafora, ha preferito chiamare un « giardino ». Di questo giardino, che è l'universo, le particelle sono in un certo senso i semi, dai quali cresce la diversità di tutto ciò che ci circonda.
In questo saggio, Gordon Kane c'illustra anzitutto come gli scienziati siano giunti a comprendere le leggi

Segue sull'altro risvolto

IN COPERTINA: FOTO © GRAZIA NERI

GRAFICA STUDIO BARONI

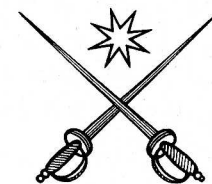
QUESTO VOLUME APPARTIENE ALLA COLLEZIONE »LA LENTE DI GALILEO« 7

»LA LENTE DI GALILEO«

VOLUME 7

IL GIARDINO DELLE PARTICELLE

di GORDON KANE

TRADUZIONE DI LIBERO SOSIO

LONGANESI & C.
MILANO

ISBN 88-304-1435-2

Traduzione dall'originale americano
The Particle Garden
di Libero Sosio

A Lois

Prefazione

E se può ridere un corpo senza per ciò che lo formino
semi che ridano, e avere senno e parlar dottamente
senza perciò che lo formino semi sapienti e facondi,
o perché mai non potrebbe ciò che è fornito di senso
venir dagli atomi privi completamente di senso?

LUCREZIO, *De rerum natura*, II, 986-990*

NEGLI ultimi tre decenni i fisici delle particelle hanno compiuto meravigliose scoperte sperimentali e teoriche. Benché le relazioni su di esse abbiano suscitato un certo interesse nel pubblico, è difficile spiegarle ai profani, per due ragioni. La ragione più ovvia risiede nella natura altamente tecnica e matematica della ricerca. La seconda ragione consiste nella difficoltà di descrivere ricerche in corso. Per gli esperti che sono abituati a riflettere in modo tecnico su un argomento è difficile scrivere su di esso in modo semplice, e a volte è difficile per autori meno tecnici scrivere su di esso in modo esatto.

Come professore all'Università del Michigan, ho avuto varie opportunità di tenere corsi di fisica per studenti che si specializzavano in materie non scientifiche. E negli anni in cui il Superconducting SuperCollider (SSC, Supercollisore a magneti superconduttori) fu al centro di infuocate discussioni pubbliche, tenni conferenze sui suoi obiettivi e sulla scienza in generale. Da tali attività, e da conversazioni con amici, appresi quel che probabilmente avrebbe dovuto essere ovvio, ossia che a molte persone piacerebbe sapere sulla fisica delle particelle gli stessi tipi di cose che io vorrei conoscere sulla storia, l'arte, la linguistica ecc.: di che cosa si occupa questa scienza? Quali sono i risultati più importanti che ha conse-

* Lucrezio, *La natura*, trad. it. di B. Pinchetti, Rizzoli, Milano, 1953, p. 76. (*N.d.T.*)

guito? Quali sono i problemi più interessanti? Noi tutti vorremmo sapere qualcosa su altri campi, ma non troppo. Mi sono proposto perciò di conseguire un tale equilibrio.

C'è poi un altro tipo di equilibrio che si deve raggiungere, quello fra risultati ben stabiliti e verificati, argomenti di frontiera studiati in modo sistematico, e nuove idee speculative ma improbabili. Persino la parte ben stabilita della fisica delle particelle è nuova, e io mi sono sforzato di sottolinearlo. Ho trattato in questo libro anche vari importanti argomenti di frontiera, fra cui in particolare la fisica di Higgs e la supersimmetria.

I primi cinque capitoli si occupano dei risultati già acquisiti, sia in passato sia in anni recenti, e della teoria che include i risultati sperimentali e teorici. Per seguire l'esposizione non si richiede una particolare competenza nel campo della fisica delle particelle. Il capitolo 6 passa in rassegna le basi sperimentali della teoria oggi stabilita, e i restanti capitoli descrivono le ricerche in corso. Il capitolo 7 introduce alcune distinzioni che ho trovato utili nel descrivere che cosa significa la parola « comprensione » per i fisici delle particelle. I capitoli dal 6 in avanti richiedono una certa conoscenza della fisica delle particelle, ma essa è fornita per intero nei capitoli precedenti. Spero che anche quei lettori che non avranno perfettamente assimilato le informazioni fornite nei primi cinque capitoli scorrano tuttavia anche la parte restante del libro, perché è pur sempre possibile ricavarne un'idea degli indirizzi presenti e futuri dell'esplorazione della natura a opera della fisica delle particelle, e dei tipi di domande che i fisici delle particelle stanno ponendosi oggi. Ulteriori informazioni saranno fornite nelle didascalie di alcune figure.

Nel corso degli anni ho sviluppato alcuni modi per spiegare idee e risultati, e altri modi ho imparato da altre persone. Può darsi che qualcuno fra gli esempi, le analogie e le descrizioni che uso siano fra quelli che ho appreso da altri, ma tanto tempo fa da aver perso nozione del mio debito: vorrei qui esprimere le mie scuse e la mia gratitudine a tali

persone ignote. Un uomo a cui devo certamente molto per i miei metodi, da lungo tempo consolidati, di apprendimento e di insegnamento è il professor J.D. Jackson, relatore alla mia tesi di laurea e attualmente mio amico, a cui porgo qui il mio cordiale ringraziamento.

Ho scritto questo libro su suggerimento di Jack Repcheck della Addison-Wesley. È stato per me un onore lavorare con un editor la cui intelligenza ha dato origine alla collana Helix per arricchire la comprensione della scienza. Lo ringrazio per il suo incoraggiamento, senza il quale quest'opera non avrebbe mai visto la luce.

Scrivendo il libro, sono stato molto aiutato da mia moglie Lois. A lei si deve molto di ciò che c'è di buono in esso, dal titolo a gran parte della chiarezza e dell'eloquenza che può avere. È stato un piacere dividere questa fatica con lei. Voglio esprimere qui, inoltre, il mio apprezzamento per gli utilissimi suggerimenti e commenti da parte dei molti amici che hanno gentilmente sottratto tempo ad altre cose per leggere il manoscritto, in particolare a Marty Einhorn, Nancy Elder, John Hilton, Chris Kolda, Eric Rabkin, Jean Rivkin, Jeff Rivkin, Bill Rosenberg, Marc Ross e Jim Wells. Ho avuto utili discussioni anche con Sandy Faber, Len Sander e Jack Van der Velde. Di qualsiasi errore concettuale o formale sono ovviamente l'unico responsabile.

Prologo

1624. Tre dotti annunciarono a Parigi che avrebbero tenuto lezioni a sostegno della tesi che la materia è composta da atomi. Le autorità ordinarono che il pubblico fosse disperso e che gli scritti dei dotti fossero confiscati, e proibirono qualsiasi insegnamento sugli atomi pena la condanna a morte. Sette anni dopo tutti i gesuiti ricevettero dai vertici della gerarchia del loro ordine la proibizione di credere o insegnare che gli oggetti sono composti da atomi.

1906. Il fisico austriaco Ludwig Boltzmann era in uno stato di completa frustrazione e depressione. Per tre decenni aveva tentato, venendo spesso coinvolto in sgradevoli controversie, di convincere scienziati europei influenti dell'esistenza degli atomi. Quello stesso anno si suicidò. Per una curiosa ironia, solo pochi anni dopo nuove prove condussero infine a un'accettazione scientifica quasi completa dell'esistenza degli atomi.

1963. Il brillante fisico americano Richard Feynman iniziò le sue straordinarie lezioni di fisica* con la frase seguente: « Se, nel corso di un qualche cataclisma, dovesse andare distrutto tutto il sapere scientifico, e si potesse trasmettere alla successiva generazione solo una frase, quale proposizione conterrebbe il massimo d'informazione nel minor numero di parole? Io credo che sia l'*ipotesi atomica* (o il *fatto atomico*, o comunque vogliate chiamarlo) che *tutte le cose sono composte da atomi...* »

* Tali lezioni (*Lectures on Physics*, 3 voll.), edite in America fra il 1963 e il 1965 e riproposte in una nuova edizione nel 1989, sono state tradotte in italiano con il titolo *La fisica di Feynman*, 3 voll. (5 tomi), Masson, Milano, 1985-1991. (*N.d.T.*)

1
Di che cosa siamo fatti?

Atomi e protoni hanno una struttura, ma forse quark e leptoni no. In questo caso essi sarebbero i componenti elementari della natura, e di noi stessi

Una grande varietà di particelle, così piccole che ciascuna presa a sé è ancor meno che insignificante, e così numerose da non poter essere contate, costituiscono i semi di quel giardino che è il nostro universo. Nell'antica Grecia alcuni filosofi si chiesero di che cosa siano fatte le cose, e pervennero alla conclusione che il complicato funzionamento della natura dipenda da minuscole particelle. Essi coniarono la parola *atomos*, che significa « indivisibile », la quale passò poi a designare la particella più piccola di un elemento, formata da un nucleo attorno al quale orbitano elettroni. La maggior parte delle persone, se interrogate sull'argomento, ammetterebbero probabilmente che Adamo era formato da molecole, composte a loro volta da atomi. È vero, ma non è tutto. Noi oggi sappiamo, infatti, che gli atomi di Adamo erano composti da particelle dette quark ed elettroni, legate assieme da particelle chiamate gluoni e fotoni.

Nell'aprile del 1994 alcuni sperimentatori del Fermi National Accelerator Laboratory, a Chicago, annunciarono di aver trovato prove della realtà del quark *top*, con grande soddisfazione dei fisici teorici che ne avevano predetto l'esistenza. La loro ricerca veniva in un certo senso a concludere con successo due millenni e mezzo di sforzi umani miranti a comprendere come l'universo naturale funzioni e di che cosa sia composto, poiché il quark *top* è probabilmente l'ultima particella della comune materia che sarà mai scoperta. L'epoca moderna di quella che venne infine chiamata fisica delle particelle ebbe inizio a mio avviso nel dicembre 1910, quando Ernest Rutherford dimostrò sperimentalmente che

gli atomi erano formati da un minuscolo nucleo circondato da elettroni. Da quell'intuizione, e dagli esperimenti che essa suggerì, ebbe inizio un cammino lineare che giunse alla meta con la scoperta del quark *top* nel Fermilab. Gli esperimenti eseguiti da Rutherford e dai suoi collaboratori furono i primi nei quali si spararono contro un bersaglio proiettili subatomici ad alta velocità, e in cui si rivelarono e studiarono le particelle subatomiche risultanti. Esattamente lo stesso approccio si è usato per produrre e rivelare il quark *top*, usando però proiettili con un'energia un milione di volte superiore a quella dei proiettili usati da Rutherford.

Qualcuno ha osservato che ci sono due tipi di geni. I geni del primo tipo sono persone più intelligenti di noi e fanno cose che la maggior parte di noi non sarebbe mai in grado di fare, ma una volta che hanno ottenuto i loro risultati noi comprendiamo subito in che modo vi sono pervenuti; quelli del secondo fanno compiere alla conoscenza grandi passi avanti dinanzi ai quali anche i migliori fra i loro colleghi non possono far altro che stupirsi. Rutherford appartenne al primo tipo. Nato nel 1871 in Nuova Zelanda, conseguì risultati abbastanza buoni da ottenere una borsa di studio a Cambridge. Fu poi professore alla McGill University, all'Università di Manchester (dove scoprì il nucleo) e infine a quella di Cambridge. Fu amato e rispettato, e ben retribuito. A volte i grandi scienziati sono persone singolari, sulle quali si accumulano aneddoti affascinanti. Non fu così per Rutherford: benché ci sia qualche aneddoto su di lui, essi tendono a suscitare al più qualche incerto sorriso. Egli fu semplicemente un bravo scienziato, operoso, efficiente, che fece alcune fra le scoperte più importanti del suo secolo.

Sotto certi aspetti, la scoperta del quark *top* e molti fra i contributi (descritti in questo libro) agli immensi progressi che si stanno facendo oggi nella conoscenza del modo di operare dell'universo, hanno parecchio in comune con l'attività di Rutherford. La scoperta dell'ultimo quark è un risultato notevole, che ha richiesto l'integrazione di una varietà di tecniche e di approcci di avanguardia. Non che i quark *top* non fossero presenti anche prima; dalle loro proprietà attese (e oggi probabilmente misurate), possiamo stimare che da qualche parte sulla Terra si produca un quark *top* varie volte ogni minuto, attraverso una collisione di una particella dei raggi cosmici proveniente dallo spazio col nucleo di un atomo dell'atmosfera terrestre. Un quark *top* potrebbe prodursi in quest'istante nell'atmosfera sopra Chicago, e il successivo sull'Oceano Atlantico. I quark *top*, inoltre, sono instabili, trasformandosi entro una piccola frazione di secondo in altre particelle, cosicché possiamo dedurne l'esistenza solo dall'osservazione di configurazioni insolite in particelle altrimenti normali. Il problema è quello di produrli in un luogo in condizioni controllate e rivelarli: un compito che presuppone la disponibilità di un acceleratore di energia e intensità sufficientemente elevate, cosa che fu infine ottenuta dopo vari potenziamenti di acceleratori già esistenti al Fermilab. Un rivelatore capace di vedere le configurazioni insolite fu infine costruito da un gruppo di varie centinaia di buoni fisici sperimentali, che dovettero collaborare fra loro in modo forse non diverso dalla cooperazione su lunghe durate di tempo richiesta in passato dalla costruzione delle grandi cattedrali gotiche. Alcuni hanno deplorato che le frontiere della conoscenza siano avanzate a tal punto rispetto al secolo scorso che oggi gli individui non possano più fare scoperte significative. Io tendo invece a essere favorevolmente impressionato dal fatto che un gran numero di buoni scienziati possano oggi lavorare insieme, in circostanze difficili e impegnative, per compiere nuove scoperte sulle proprietà basilari del nostro universo.

Sorprendentemente, oggi la maggior parte dei fisici crede che tutte le cose che vediamo, dalle più piccole alle più grandi, siano composte da tre sole particelle. Una è l'elettrone: quello stesso elettrone che si muove nei fili quando usiamo l'elettricità. Gli altri sono il quark *up* (su) e il quark *down* (giù). I quark sono molto simili agli elettroni. Nell'universo ci sono anche particelle che non compongono nulla di visibile: sono tipi addizionali di particelle che si richiedono per com-

Frank & Ernest (Per gentile concessione della NEA, Inc.)

pletare l'universo qual è. In altri capitoli esamineremo le prove che possediamo della loro esistenza.

Come abbiamo visto nel Prologo, in passato non fu facile accettare l'idea che noi e il nostro mondo siamo fatti di piccole particelle passive, gli « atomi ». Oggi le difficoltà non sono più create da concezioni religiose o filosofiche, ma dall'astrusità di ciò che stiamo apprendendo. Nuove conoscenze sulle particelle sono andate accumulandosi dalla metà degli anni '60 e hanno conseguito l'accettazione pressoché universale dei fisici a partire dalla metà degli anni '80, ma gran parte delle cose più interessanti non sono ancora molto accessibili. I fisici delle particelle sono soliti descrivere il sapere acquisito sul mondo subatomico in notazione matematica anziché a parole. Io sono uno dei pochi fisici che si sono cimentati nel tentativo di spiegare a parole ciò che si è imparato in questi anni sulla semplicità e sull'armonia del funzionamento dell'universo. Spero, attraverso questo libro, di aiutare altre persone a vedere le regolarità che danno origine alla natura, compresi *noi* tutti.

Questo è un libro prudente. Io vi descrivo i risultati su cui c'è un vasto consenso e che formeranno la base per future ricerche, insistendo in particolare sull'idea che la scienza esige esperimenti per stimolare e verificare qualsiasi forma di comprensione della natura. C'è un approccio alternativo, che tenta di conseguire grandi progressi in modo puramente teorico, saltando a una comprensione completa della natura. Esiste una felice rivalità fra i « teorici delle stringhe », che creano costrutti matematici e sperano che corrispondano ai

dati, e i « fenomenologi » come me, che preferiscono integrare lo studio di modelli fondati su dati con il suggerimento di obiettivi agli sperimentatori.

Se il metodo deduttivo – detto anche « dall'alto al basso » – fosse effettivamente in grado di funzionare da solo, potremmo conseguire rapidamente una comprensione profonda della natura, ma in realtà sono stati i metodi graduali della fenomenologia a condurci dove ci troviamo ora. La situazione è forse simile a quella della lepre e della tartaruga. Mi piacerebbe che vincesse la lepre, perché in tal caso si potrebbero conseguire le risposte profonde già nel corso della mia vita, ma finora si è comportata molto meglio la tartaruga. In ogni modo, sia i teorici delle stringhe sia i fenomenologi si fondano sulle particelle e sulla teoria descritte in questo libro come guida nella comprensione delle teorie con cui stanno operando, e sperano di poter essere ulteriormente illuminati dagli esperimenti in corso e da quelli ancora da venire. Essi si differenziano solo nel metodo con cui affrontano i problemi non ancora risolti che si profilano oltre l'orizzonte di questo libro.

Ho tentato di scrivere questo libro in modo tale che chiunque abbia sufficiente curiosità per l'argomento possa leggerlo. Per capirlo non si richiede una conoscenza matematica al di sopra della moltiplicazione. Il libro diventa più astratto e speculativo negli ultimi capitoli, dove descrivo le ricerche in corso su argomenti come la « fisica di Higgs », la « supersimmetria » e, in breve, le cosiddette « teorie di tutto » fondate sulle « superstringhe ».

Gli « atomi » indivisibili immaginati per la prima volta 2500 anni fa dai filosofi greci sono rappresentati attualmente dall'elettrone e dai quark *up* (su) e *down* (giù), le particelle puntiformi non ulteriormente scomponibili da cui è formato il mondo che ci circonda. La storia crea ostacoli all'uso di una terminologia appropriata; quando, nell'Ottocento, si trovò che ogni elemento chimico (ossigeno, carbonio, argento ecc.) aveva un'unità minima riconoscibile, quest'unità fu chiamata atomo. Altre ricerche, all'inizio del Novecento, ri-

velarono che gli atomi avevano in realtà una struttura (un nucleo centrale circondato da elettroni). Benché ciò significasse che gli atomi non erano le unità indivisibili concepite dai greci, essi continuarono a conservare quel nome. Successivamente si apprese che il nucleo stesso contiene protoni e neutroni e, negli anni '60 del nostro secolo, che tali particelle del nucleo – o nucleoni – sono a loro volta formate da quark.

Perché i componenti dei nucleoni hanno ricevuto nomi peculiari come «quark»? Nella loro ricerca di componenti sempre più piccoli della materia, i fisici si sono imbattuti in oggetti che non hanno più alcuna corrispondenza nella vita quotidiana. Noi dobbiamo dare dei nomi a questi oggetti per poterne parlare e scrivere. Abbiamo spesso ceduto alla tendenza a umanizzare tali scoperte inattese con nomi un po' stravaganti, come «sapore», «colore» o «incanto». Spesso i nomi suggeriscono le proprietà che sono state scoperte. Per esempio, i quark hanno un nuovo tipo di carica, simile alla carica elettrica. Tutti sanno che ci sono due tipi di carica elettrica, positiva e negativa. La nuova carica presenta altri tipi, e le regole per combinarli sono diverse da quelle vigenti per la carica elettrica. In virtù della nuova carica tre quark, ognuno dei quali ha una carica diversa da quella degli altri due, sono attratti fra loro e si legano in un protone, che risulta essere privo di carica. Poiché questa situazione ricorda la combinazione dei tre colori primari da cui è formata la luce bianca, i fisici hanno chiamato questo tipo di carica «colore». Essa non ha, ovviamente, alcun tipo di rapporto con i colori della luce, ma è solo un modo utile per comunicare. Ognuno dei nomi apparentemente frivoli usati dai fisici ha un preciso significato matematico. Inoltre l'uso di questi vocaboli è una forma di affettuoso rispetto per i modi di operare nascosti della natura, a scale alle quali noi in condizioni normali non possiamo accedere. Vedremo in seguito come furono adottati alcuni nomi come quark su, giù e altri.

Quark ed elettroni sono «semi» della natura?

I semi comuni che usiamo in giardino contengono un'informazione genetica che dirige il loro sviluppo, determinando la nascita di rose o di ortensie. L'informazione che dirige le particelle si trova invece nelle interazioni che esse hanno con altre particelle. Benché ogni singola interazione non abbia alcuna finalità, gli esiti possibili delle interazioni permettono o vietano il verificarsi di certe cose in natura.

Consideriamo, per esempio, il pensiero speculativo. Esso richiede un organo della riflessione (come il cervello umano) composto da miliardi di neuroni, ognuno dei quali si compone di migliaia di molecole formate da atomi. Ma la grandezza dell'atomo è fissata da tre quantità basilari: la massa dell'elettrone, la forza dell'interazione che può legarlo a un nucleo e il valore della quantità (chiamata costante di Planck) che fissa la scala dei fenomeni della teoria quantistica. Sono quindi le proprietà delle particelle, e le leggi che ne governano il comportamento, a fissare una grandezza minima per gli atomi e quindi per un organismo capace di un pensiero speculativo. Essendo piccola, una farfalla può essere bella, ma non può essere dedita alla speculazione; un essere umano può essere entrambe le cose.

La natura permette l'esistenza di organismi abbastanza grandi da possedere un pensiero speculativo, dei quali però, a causa della loro complessità, non potremmo predire l'esistenza sulla base di un ragionamento teorico fondato su quark ed elettroni. Caso e tempo hanno cospirato a creare questo mondo a partire da ciò che è permesso dai componenti, dalle interazioni e dalle regole della natura. Cosa mirabile, queste condizioni hanno permesso l'emergere di esseri che non solo speculano, ma che speculano sulla loro origine e composizione, che hanno concepito e apprezzano nozioni importanti come giustizia e morale, e che stanno cominciando a pensare di dover essere loro stessi a coltivare il loro giardino, l'universo.

Il metodo che ci ha permesso di apprendere di che cosa

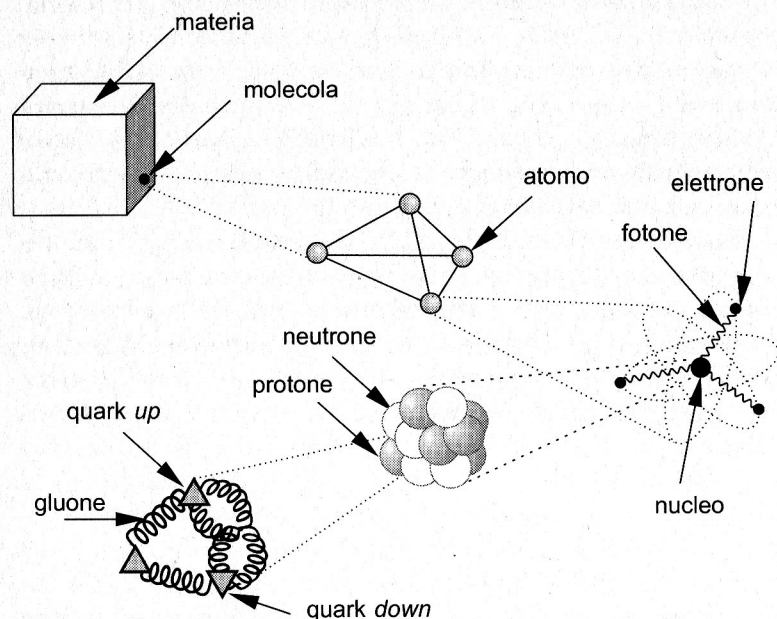



Figura 1.1. La materia è composta di molecole. Queste sono combinazioni di atomi (per esempio, il sale da cucina è formato da molecole di cloruro di sodio, ognuna delle quali contiene un atomo di cloro e uno di sodio legati insieme). Ogni atomo ha un nucleo e un certo numero di elettroni, che sono legati ad esso da fotoni. Un nucleo è composto di protoni e neutroni legati insieme. Queste particelle subatomiche sono formate a loro volta da quark legati da gluoni. Il diametro di una piccola molecola è di norma un milionesimo di centimetro circa; quello di un atomo è una decina di volte più piccolo e quello di un nucleo è 10.000 volte minore di quello dell'atomo di cui fa parte. Protoni e neutroni sono molte volte più piccoli di un nucleo. A quanto sappiamo oggi, quark e gluoni (come pure elettroni e fotoni) non hanno grandezza; gli esperimenti hanno dimostrato che quark e leptoni sono almeno mille volte più piccoli dei protoni

siamo fatti, noi e il nostro mondo, e come le varie parti si compongano assieme, ci aiuterà a sondare ancora più in profondità la materia alla ricerca di strutture: un processo che è cominciato quasi un secolo fa con gli esperimenti di Rutherford. L'obiettivo è quello di trovare componenti privi di una struttura rivelabile: i componenti fondamentali della

materia. Consideriamo un quadro, un cibo o una persona. Ogni cosa o persona è composta da molecole. Le molecole sono combinazioni di atomi. Ogni atomo è formato da elettroni legati a un nucleo. Ogni nucleo è composto da protoni e neutroni. E risulta che ogni protone o neutrone si compone di quark su e quark giù in combinazioni appropriate. La figura 1.1 illustra i vari stadi della materia.

Col tempo si troverà che anche gli elettroni e i quark sono particelle composte? In anni recenti sono emerse due linee di ragionamento – una sperimentale e una teorica – le quali hanno condotto molti fisici a credere che questo itinerario storico sia giunto al termine, e che elettroni e quark potrebbero essere i « semi », o primordi, della natura: i componenti ultimi, indivisibili, della materia.

Fino a un certo livello gli esperimenti hanno trovato una struttura, poi più niente

Ogni componente della materia, di grandezza sempre minore, fu scoperto in passato per mezzo di esperimenti che scandagliavano sempre più in profondità la materia stessa. Esperimenti recenti, condotti col massimo impegno, non sono però riusciti a scoprire strutture più profonde. In fisica, scandagliare più in profondità significa di solito colpire un oggetto con un proiettile dotato di un'energia sempre maggiore. Per esempio, se si lancia una biglia d'acciaio contro una pesca, la pallina rimbalzerà. Se però la si spara a una velocità più elevata (e quindi con una maggiore energia), la biglia penetrerà nella pesca, ma sarà respinta dal nocciolo. Potremmo quindi apprendere che le pesche hanno un nocciolo anche senza tagliarle. Si potrebbe addirittura scoprire la grandezza del nocciolo studiando quali pallottole attraversano l'intera pesca senza trovare ostacolo e quali rimbalzano.

Storicamente, ogni aumento significativo dell'energia dei proiettili ha condotto alla scoperta di un livello di struttura più profondo. Nel corso di più di mezzo secolo si sono costruiti acceleratori di particelle sempre più grandi e più po-

tenti (sui quali torneremo più diffusamente nel capitolo 5) per sondare la materia con proiettili – elettroni e altre particelle – sempre più veloci. Gli esperimenti più recenti su elettroni e quark hanno usato proiettili con energie oltre centomila volte maggiori di quelle in corrispondenza delle quali sarebbe potuta apparire una struttura se la storia avesse dovuto ripetersi ancora una volta. Eppure gli elettroni e i quark continuano ad apparirci come oggetti puntiformi impenetrabili, privi di alcuna substruttura apparente.

C'è un altro modo per apprendere sperimentalmente se le particelle oltre un certo livello abbiano o no una struttura. Quando un atomo viene colpito da un fotone (i fotoni sono le particelle che compongono la luce), può accadere che il fotone trasferisca energia all'atomo. Gli elettroni di quell'atomo assorbono l'energia e si dispongono in un modo nuovo; noi diciamo che l'atomo passa a un livello energetico superiore, ovvero che viene a trovarsi in uno « stato eccitato ». Di norma la quantità di energia necessaria perché un atomo raggiunga uno stato eccitato è di qualche elettronvolt (eV). (È un'energia piuttosto modesta, paragonabile a quella conferita dalla pila di una torcia elettrica a ogni elettrone che accelera. Quando la torcia è accesa, in ogni secondo vengono fatti passare per il filamento della sua lampadina più di un miliardo di miliardi di elettroni.) Un nucleo è molto più piccolo e molto più compatto di un atomo, cosicché per eccitarlo si richiedono vari milioni di eV. Un protone è ancora più piccolo e per eccitarlo occorrono varie centinaia di milioni di eV. Perciò, se quark ed elettroni avessero una struttura, per farli passare in uno stato eccitato occorrerebbe probabilmente un trasferimento di energia di vari miliardi di elettronvolt. Ciò non si è però mai verificato in esperimenti, anche se sono stati compiuti tentativi con energie centinaia di volte maggiori. Pare quindi che quark ed elettroni non abbiano stati eccitati. Se è così, ciò significa che non hanno una struttura interna modificabile.

Il modo esatto in cui un atomo è « composto di » elettroni in moto attorno a un nucleo, o in cui un protone è « formato da » quark, è piuttosto complicato. Per legare gli elettroni a un nucleo, i quark l'uno all'altro e via dicendo si richiede un qualche « collante ». Anche il collante risulta essere composto da particelle. Quello che lega gli elettroni a un nucleo consiste negli stessi fotoni che formano la luce che vediamo. Le particelle che legano insieme i quark sono state invece scoperte solo da poco tempo; esse vengono chiamate « gluoni » (dalla parola inglese *glue*, che significa « colla »). I gluoni sono particelle molto simili ai fotoni, ma diversamente da loro hanno una carica di colore. Poiché anche i fotoni e i gluoni sono particelle, potremmo dire che tutto è fatto di elettroni, quark, fotoni e gluoni, ma è utile considerare gli elettroni e i quark come le particelle della materia e i fotoni e i gluoni come le particelle leganti.

Occorre una teoria

C'è una ragione diversa e più sottile per cui la ricerca storica di componenti più piccoli della materia potrebbe essere giunta alla sua conclusione. Oggi esiste una teoria matematica completa che descrive *come* funzionano tutte le cose, dalle particelle alle stelle, cominciando dagli elettroni e dai quark. Essa è nota come la « teoria standard » della fisica delle particelle. In fisica la parola « teoria » ha di solito un significato preciso, del tutto diverso dal suo uso quotidiano. Una teoria non è un'idea o una congettura o un'ipotesi più o meno vaga, bensì un insieme di ragionamenti matematici ben definiti per mezzo dei quali si possono formulare previsioni per una varietà di fenomeni. L'obiettivo di ogni processo di spiegazione in fisica è quello di trovare la teoria che includa e metta in relazione ciò che si conosce.

Né la teoria né l'esperimento presi separatamente possono permetterci di capire il mondo reale. Gli esperimenti, in assenza di una teoria, sono difficili da interpretare e da mettere in relazione con altri esperimenti; la teoria in assenza di esperimenti è semplice congettura. La teoria standard è un sistema di riferimento concettuale che unifica la nuova cono-

scenza di decenni recenti con ciò che si era appreso sul mondo fisico nei secoli scorsi, con i risultati ottenuti da Newton, Maxwell, Einstein, Heisenberg e molti altri. È la combinazione dell'esperimento e della teoria standard a permetterci di concludere che i quark e gli elettroni sono i mattoni elementari della natura.

In questo libro, prima descriverò la migliore teoria attuale delle particelle e delle loro interazioni, e poi esaminerò gli argomenti a sostegno della tesi che essa possa essere ancora migliorata. Di norma le teorie vengono formulate per spiegare il comportamento di qualche insieme di oggetti, le loro dimensioni, proprietà ecc. Una teoria può essere considerata corretta – ossia accettata come una buona descrizione del mondo reale – in virtù di una combinazione di prove sperimentali e di buon potere esplicativo. Se si va oltre l'ambito nel quale la teoria è formulata e confermata sperimentalmente (nella direzione di oggetti di dimensioni minime come i quark o di oggetti alla scala massima, come l'universo), essa può condurre allora a previsioni scorrette. Infine il nuovo ambito sarà descritto da una teoria estesa, la quale abbraccerà un maggior numero di fenomeni e di spiegazioni.

Se guardiamo verso i grandi spazi dell'astronomia anziché verso la piccola scala del mondo subatomico, le nostre conclusioni sui componenti elementari della materia ne vengono rafforzate. Sappiamo che la Terra e la Luna sono composte da atomi. Da molti decenni ci è noto che il Sole e persino le stelle più lontane sono composti degli stessi atomi e molecole che sono presenti sulla Terra. Lo abbiamo appreso confrontando i colori della luce che ci perviene dalle stelle con quelli di sostanze portate all'incandescenza in laboratorio. Quando un atomo entra in collisione con un altro, come spesso accade nelle stelle, può assorbire energia e passare dal suo stato normale – o «fondamentale» – a un livello «eccitato». Dopo un po' di tempo l'atomo torna allo stato fondamentale, liberandosi dell'eccesso di energia, che emette sotto forma di luce (fotoni). I colori della luce irraggiata nel corso di questo processo sono diversi per ogni elemento

chimico e lo caratterizzano in modo unico. Dalla Luna alle strutture più grandi che possiamo osservare, l'intero universo è composto dagli stessi novantadue elementi naturali che possediamo sulla Terra, ognuno dei quali è composto di elettroni e di un nucleo, formato a sua volta da protoni e (di solito anche) da neutroni, i quali protoni e neutroni sono costituiti da quark su e quark giù.

«Ci sono più cose in cielo e sulla terra...»

Negli ultimi cinquant'anni abbiamo scoperto che ci sono altre particelle ancora oltre a quelle che formano ciò che vediamo. Nei secoli scorsi avevamo imparato che la Terra non è il centro dell'universo, ma orbita attorno al Sole, e poi che il nostro Sole è solo una stella comunissima, simile a miliardi di altre stelle. Ora abbiamo appreso che molte, e forse la maggior parte delle particelle dell'universo, sono diverse dalle particelle di cui è composto il nostro corpo.

I leptoni e gli altri quark

La prima di queste particelle a essere scoperta fu il neutrino, un oggetto inafferrabile sempre in movimento, non soggetto ad alcuna forza (e quindi non legato in protoni, nuclei ecc.), che a volte – ma solo molto di rado – entra in collisione con un quark (su o giù) o con un elettrone. Ci sono inoltre altri quattro quark, detti quark *charm* (incanto), *strange* (strani), *top* (alto) e *bottom* (basso), e due particelle, i mesoni mu e tau (noti anche come muoni e tauoni), che assomigliano sotto molti aspetti all'elettrone. Quest'ultimo forma, con i neutrini e i mesoni mu e tau, il gruppo delle particelle chiamate «leptoni». Questi vengono prodotti in natura dalle collisioni dei raggi cosmici con particelle dell'alta atmosfera, come pure, in laboratorio, negli esperimenti compiuti negli acceleratori di particelle.

Benché leptoni e quark possano essere indivisibili, sono

più interessanti degli « atomi » degli antichi pensatori greci perché, in certe condizioni, possono trasformarsi in altre particelle. Fra le interazioni di particelle, ce ne sono alcune che permettono a una particella di trasformarsi in altre due o più particelle (con probabilità calcolabili). Quando una particella più pesante si converte in varie particelle più leggere, si parla di « decadimento ». Gli « altri » quark e leptoni (quelli che abbiamo introdotto in questa sezione, ossia quelli che non compongono la comune materia, e che chiameremo in seguito per semplicità quark e leptoni addizionali) non si trovano nelle cose attorno a noi perché sono instabili. Essi esistono solo per un tempo brevissimo prima di decadere in quark su e giù e in elettroni e neutrini. Il muone è, fra i quark o leptoni addizionali, quello di vita più lunga: e tuttavia vive solo un milionesimo di secondo prima di decadere in un elettrone e in due neutrini.

La parola « decadimento » è usata dai fisici in un modo tecnico molto preciso (senza alcuna delle connotazioni negative di solito associate al verbo del linguaggio comune « decadere »). Il decadimento è semplicemente un modo in cui una particella si converte in altre particelle. A causa di interazioni, una particella può decadere pur senza avere in alcun senso una struttura. Sono le interazioni stesse ad annichilare, o assorbire, la particella iniziale, e a creare le particelle finali. I fisici concepiscono oggi tutte le interazioni in questo modo forse un po' strano. Quando un fotone viene riflesso da uno specchio, i fisici descrivono questo fenomeno dicendo che un fotone incidente viene assorbito o distrutto da un atomo nello specchio, mentre un altro fotone viene emesso (creato) da un atomo nello specchio. La stessa descrizione viene usata in relazione a collisioni in cui cambia il tipo di particella: si dice allora che le particelle iniziali vengono « distrutte » e quelle finali « create ».

Sorprendentemente, anche se non comprendiamo il ruolo svolto nello schema fondamentale della natura da queste « altre » particelle (i quark incanto, strani, *top* e *bottom*, i leptoni mu e tau e i neutrini), siamo in grado di prevedere con grande precisione ogni aspetto del loro comportamento, dalla probabilità che un certo numero di esse vengano create in qualsiasi esperimento o collisione, alla durata della loro sopravvivenza prima di decadere in altre particelle, alle particelle in cui probabilmente decadranno. Da una considerazione delle loro proprietà possiamo renderci conto che tali particelle sono intimamente correlate agli elettroni e ai quark, cosicché una comprensione finale del *perché* ci sono elettroni e quark dovrà implicare anche tali altre particelle, benché una descrizione delle cose che ci circondano non dipenda in alcun modo da esse. Dal punto di vista della teoria standard tutte le particelle hanno un ruolo uguale: il fatto che noi siamo composti da alcuni tipi e non da altri non ha alcuna importanza per la teoria. In questo capitolo sto descrivendo il mondo quale appare dal punto di vista degli esseri umani; nel capitolo 4 tratterò tutte le particelle su una base di uguaglianza e ignorerò il pregiudizio derivante dal tenere presente solo il nostro mondo.

Le « altre » particelle possono sembrare molto diverse da un elettrone, che, lasciato a sé, continua a esistere, mentre un muone o un quark pesante decadono in meno di un milionesimo di secondo. È tuttavia corretto considerarle tutte come particelle nello stesso senso, in quanto ognuna di esse ha un insieme unico e immutabile di proprietà che possono essere identificate in qualsiasi condizione. La maggior parte di tali proprietà non hanno alcuna corrispondenza nel mondo quotidiano e a tutta prima possono sembrare sconcertanti. Una particella può essere specificata dalla massa, dallo spin, dalle tre cariche (la carica elettrica, la carica « di colore » che abbiamo menzionato in precedenza, e un altro tipo di carica di cui non ci siamo ancora occupati, la cosiddetta carica « debole »), e da tre etichette numeriche (note come « numero barionico », « numero leptonico » e « numero di famiglia »). Queste sono tutte le cariche ed etichette di cui siamo a conoscenza oggi. Per quanto tutto questo possa apparire complesso, una volta che abbiamo identificato questo insieme di proprietà di una particella diventa

possibile descriverne il comportamento in tutti gli esperimenti: possiamo prevedere quanti esemplari se ne produrranno in un certo tipo di collisione, la durata di vita di ogni particella e via dicendo. (Torneremo più diffusamente in altri capitoli su queste proprietà e su ciò che rappresentano.)

Le antiparticelle

Ci sono « altre » particelle anche in un altro senso. Nel 1928 Paul Dirac dimostrò che qualsiasi teoria in grado di integrare con successo la meccanica quantistica e la relatività ristretta di Einstein (come per esempio la teoria standard) richiedeva che ogni particella avesse un partner. Le particelle sono rappresentate nella teoria da soluzioni delle equazioni della teoria stessa. Dirac mostrò che, se le equazioni avevano una soluzione per una particella, avevano sempre una soluzione anche per un'altra particella, con tutte le cariche di segno opposto ma altrimenti identica. Se esisteva l'elettrone, con carica elettrica negativa, una certa massa ecc., doveva esistere anche un'altra particella con la stessa massa ecc. ma di carica elettrica positiva. Questo risultato valeva per tutte le particelle. Il partner fu chiamato antiparticella. Ci sono antiquark su, antigluoni ecc. Nel caso delle particelle prive di carica, come il fotone, l'antiparticella coincide con la particella, cosicché questa distinzione viene ignorata. In questo libro mi riferirò sempre a specifiche antiparticelle premettendo il prefisso « anti » al nome della particella, eccezion fatta però per l'antielettrone, che fu la prima antiparticella scoperta e che ebbe un nome suo proprio, quello di « positrone ». Il simbolo di una particella soprassegnato indica la relativa antiparticella; per esempio, l'elettrone è rappresentato dalla lettera e e il positrone da $\bar{e}$. Sull'antimateria c'è una certa mistica popolare, che è però fondamentalmente sbagliata. Le antiparticelle non sono altro che particelle, e quale, fra una coppia di partner, sia la particella e quale l'antiparticella, è solo un fatto di convenzione. Io le tratterò quindi nello stesso modo.

Una cosa sorprendente è che l'esistenza di antiparticelle fu prevista sulla base di un'argomentazione puramente teorica, la quale fu poi confermata dall'osservazione. In realtà le cose notevoli furono due. Innanzitutto, una volta riconosciuta sperimentalmente l'esistenza dei positroni ci si rese conto che queste particelle erano già state osservate in precedenza, ma che erano state ignorate perché non ci si attendeva che esistessero. Particelle con carica elettrica di segno opposto, come elettroni e positroni, disegnano curve opposte in un campo magnetico. Particelle che tracciavano curve « sbagliate » erano state notate negli anni '20, ma l'osservazione non era stata presa sul serio perché non sembrava avere un senso: riconoscere che un effetto anomalo è in realtà un nuovo fenomeno richiede una grande perspicacia. Nel 1932 Carl Anderson, al California Institute of Technology, prese finalmente sul serio l'osservazione e la riferì. Vedendo la sua relazione, altri fisici si resero subito conto che quelle traiettorie altro non erano che tracce degli antielettroni (i positroni) previsti da Dirac. La seconda cosa notevole nella scoperta delle antiparticelle fu il fatto che il pensiero umano guidato da una teoria abbia potuto effettivamente prevedere l'esistenza di una parte della natura in precedenza sconosciuta.

La materia oscura

Potrebbe esserci un altro tipo ancora di particelle che non si trovano in tutto ciò che vediamo intorno a noi. I quark e leptoni « addizionali » non sono presenti in noi perché, ogni volta che una di queste particelle viene prodotta, decade immediatamente, in meno di un milionesimo di secondo. Le antiparticelle non sono presenti in noi perché, non appena vengono create, si annichilano con le relative particelle in un'esplosione di energia. Il terzo tipo di particelle assenti da noi e dal mondo della nostra esperienza è chiamato « materia oscura ». Queste particelle interagiscono così poco con le altre da non legarsi mai in protoni o in nuclei o in atomi. Vedremo più avanti, nei capitoli 9-12, quali ragioni ci indu-

cano a credere nella loro esistenza, e quali siano le loro connessioni con le altre particelle.

I nostri elettroni e quark

Gli elettroni e i quark su e giù presenti in noi esistono nella loro grande maggioranza dai primissimi minuti dell'universo. Questo ha avuto origine in un big bang caldissimo, in cui furono create tutte le particelle (tutti i quark, i leptoni, i fotoni, tutte le antiparticelle, le particelle della materia oscura ecc.). Al raffreddarsi dell'universo i quark e leptoni più pesanti decaddero in quark e leptoni più leggeri, e alla fine rimasero solo gli elettroni e i quark su e giù. Questi ultimi si combinarono a formare protoni e neutroni. Quando un protone o un nucleo proveniente dall'esterno del nostro sistema solare (ossia una particella dei «raggi cosmici») entra in collisione con un nucleo nella nostra atmosfera, crea particelle: o elettroni e quark su o giù, o particelle che decadono formando tali leptoni. A parte questi pochi leptoni così formati, tutte le particelle presenti in noi esistono nell'universo fin dal tempo del big bang.

Che cosa «sono» quark e leptoni?

Non sappiamo ancora esattamente che cosa siano quark e leptoni. Essi non sono semplicemente minuscoli frammenti di materia, e non esiste alcuna semplice analogia con cose della nostra vita quotidiana che possa aiutarci a visualizzarli. Noi possiamo caratterizzarli, ma non spiegarli in termini di qualcos'altro. In fisica spiegare qualcosa significa di norma dare un'interpretazione quantitativa in termini di altre cose che sono comprese (le analogie possono aiutare a visualizzare ma non sono spiegazioni): per esempio, i protoni e le loro proprietà vengono spiegati in riferimento ai quark legati da gluoni che li compongono. Chiedere che cosa «sono» le particelle è come chiedere che cosa «sono» lo spazio e il tempo. Conosciamo le loro proprietà e i loro effetti ma per

dire che cosa siano si richiedono nuove conoscenze. Torneremo su questo argomento nei capitoli 7 e 11, quando esamineremo le idee correnti sulla rottura della catena consistente nello spiegare ogni cosa in termini di qualcos'altro, e chiariremo che cosa significhino le parole «spiegare» e «predire».

Benché ci siano ancora domande importanti che attendono una risposta, è sorprendente constatare quante cose siano state apprese nei decenni scorsi. Ci sono buone ragioni per credere che, dopo secoli di ricerche, i fisici abbiano finalmente scoperto di che cosa siamo fatti. Se guardiamo dentro gli oggetti che ci circondano vediamo atomi, e se guardiamo dentro gli atomi vediamo quark su, quark giù ed elettroni, legati da gluoni e fotoni. Quest'affermazione si fonda su un secolo di esperimenti di scomposizione di oggetti, e su una teoria quantitativa che, attraverso l'interpretazione dei risultati sperimentali, ci insegna a scoprire la struttura delle cose. Poiché gli oggetti del mondo sono complicati, la teoria per ricostruirne la struttura conduce necessariamente a situazioni in cui la complessità ci impedisce di calcolare i dettagli. Finché una teoria riesce a spiegare gli esperimenti e i loro risultati, e finché l'ambito di tali esperimenti viene giudicato sufficientemente grande, gli scienziati la accetteranno come valida. E una teoria accettabile non deve avere vuoti concettuali, né deve aver bisogno di miracoli per scavalcare i crepacci. La cosiddetta teoria standard delle particelle soddisfa tali condizioni.

L'unificazione

Il mondo che ci circonda è molto complicato, e presenta una grandissima varietà di fenomeni che sembrano diversissimi l'uno dall'altro. Un arcobaleno, un cielo azzurro e un tramonto possono sembrarci assai diversi fra loro, ma in realtà sono altrettanti fenomeni dovuti alla diffusione della luce solare, da parte di goccioline di pioggia o dell'atmosfera.

L'intento della fisica è quello di spiegare e comprendere il mondo naturale per mezzo di princìpi semplici sottostanti. La scomposizione delle cose – il metodo riduzionistico – ha condotto a grandi progressi nella descrizione della natura. La fisica ha avuto un grande successo anche nell'unificazione di cose apparentemente diverse, riconducendo una varietà di fenomeni considerati eterogenei a uno stesso meccanismo sottostante.

La primissima unificazione fu la dimostrazione, fornita più di tre secoli fa da Isaac Newton, che i moti « celesti » e terrestri – che dall'antichità erano stati giudicati sostanzialmente distinti – obbediscono in realtà alle stesse leggi. Molti risultati scientifici ottenuti nell'Ottocento possono essere ritenuti delle unificazioni. Un tempo calore e suono sembravano due cose diverse, mentre oggi sappiamo che sono dovuti entrambi al moto di molecole. Anche diverse forme di energia – l'energia del moto (energia cinetica), l'energia potenziale gravitazionale, il calore generato dall'attrito, l'energia chimica, la massa e altre ancora – venivano un tempo considerate distinte, mentre oggi sappiamo che possono essere convertite tutte l'una nell'altra e che per qualsiasi sistema isolato l'energia totale rimane immutata. Le teorie dell'elettricità e del magnetismo furono unificate da James Clerk Maxwell negli anni '60 dell'Ottocento (press'a poco nello stesso periodo in cui Charles Darwin pubblicò la teoria dell'evoluzione per selezione naturale). L'unificazione di Maxwell produsse effetti molto importanti quando risultò che spiegava anche la luce e l'ottica. È accaduto spesso nella storia che una nuova teoria conducesse a nuove comprensioni e previsioni del tutto impreviste; è presumibile che ciò continuerà a ripetersi in futuro.

Nell'Ottocento si verificarono unificazioni anche in chimica e in biologia. Prima della teoria dell'evoluzione i rapporti fra specie diverse ma simili fra loro (come l'uomo e lo scimpanzé) erano misteriosi. La comprensione che specie distinte si sono evolute a partire da un progenitore comune condusse a percepire un'altra unità nell'apparente complessità del mondo della natura. L'evoluzione unificò anche la nostra

comprensione del mondo attuale con quella di milioni di anni di preistoria. Benché la documentazione geologica e fossile dei tempi preistorici ci mostri un mondo e forme di vita diversi da quelli attuali, l'evoluzione è il concetto unificatore che ci ha condotto a comprendere che ciò che è esistito prima di noi è connesso a noi e a tutte le specie contemporanee. Fino alla metà dell'Ottocento si pensò inoltre che le sostanze chimiche organiche e quelle inorganiche fossero separate e fondamentalmente diverse fra loro; poi si imparò che erano solo combinazioni diverse degli stessi atomi, che obbedivano alle stesse leggi.

Nel XX secolo Einstein unificò i nostri concetti di tempo e di spazio, di massa ed energia. La teoria quantistica fornì le regole per calcolare le proprietà di atomi e molecole, conducendo così a unificare gli ambiti della fisica e della chimica. Astronomia e fisica vennero sempre più a sovrapporsi. Dalla luce stellare che perviene fino a noi abbiamo appreso che la Terra e il Sole e le stelle nell'intero universo obbediscono tutte alle stesse leggi naturali. Poiché la luce si propaga con una velocità ben precisa, quella che ci perviene da stelle lontane fu emessa molto tempo fa, ma può essere riconosciuta come luce emessa dagli stessi tipi di atomi che abbiamo sulla Terra, e soggetta alle stesse regole della teoria quantistica che determinano i colori della luce emessa da ciascun atomo. La luce delle stelle ci fornisce una prova sperimentale che le leggi della natura non sono cambiate nel corso di miliardi di anni.

Il ruolo della teoria

Quella che io chiamo teoria standard è nota di solito, per ragioni storiche, come il modello standard. In qualsiasi area della fisica, il desiderio di spiegare le osservazioni conduce a proporre inizialmente una quantità di modelli. Un modello è in generale un tentativo di fornire una spiegazione parziale di un fenomeno, e viene usato come guida per ulteriori ri-

cerche. In fisica è un insieme di assunti e di regole, in linguaggio matematico, che incorpora una certa quantità di conoscenze, e mira a istituire qualche relazione fra ciò che descrive e qualche nuovo risultato sperimentale o teorico. Un modello ci permette di fare previsioni. In proposito possiamo distinguere tre casi. Esso può predire con esattezza un valore preciso per qualcosa che conosciamo, risultato che accresce la nostra fiducia in esso e nelle altre sue predizioni. Oppure può fornire un valore erroneo, nel qual caso dev'essere modificato o abbandonato. Oppure ancora, qualora si ignorino altre quantità necessarie per la previsione, il modello può essere in grado di fornire solo un ambito di valori. Nel caso che il valore osservato sia compreso in quest'ambito, il risultato ottenuto viene considerato incoraggiante e induce gli scienziati a lavorare ulteriormente sul modello stesso. Al passare del tempo altri particolari vengono aggiunti al modello, che viene ad abbracciare un maggior numero di spiegazioni. A un certo stadio, non esattamente definito, il modello viene accettato come teoria (oppure gli scienziati perdono qualsiasi interesse per esso, per esempio per il fatto che alcune sue implicazioni risultano sbagliate). In una qualche fase i fisici cominciano a chiamare il modello che ha più successo « modello standard », tanto per dargli un nome.

In fisica delle particelle, negli anni '70 il modello standard, dopo essere stato meglio stabilito e confermato sperimentalmente, venne accettato come una spiegazione compiuta della natura al suo livello, e venne promosso a modello standard per antonomasia. Il modello standard non è più un modello, ma è oggi la teoria matematica più completa e raffinata che sia mai stata prodotta nella storia della scienza. L'unico senso in cui esso è un modello è il senso storico. Per sottolineare questa distinzione fra modello e teoria, in questo libro l'ho chiamato la teoria standard, anche se nella maggior parte della letteratura di fisica delle particelle si continua a usare la vecchia denominazione.

Oltre a svelarci alcuni segreti sui componenti fondamentali della materia, la natura ci ha anche mostrato in modo gentile

e rassicurante che, per quanto in profondità possiamo sondare, non emergono altre strutture all'interno dell'elettrone e dei quark su e giù, ma solo altri quark e altri leptoni. È presumibile che i quark e i leptoni addizionali (muoni, quark *top*, neutrini ecc.) abbiano un ruolo più profondo da svolgere nella teoria completa, essendo in qualche modo richiesti per rendere possibile l'esistenza di un universo come il nostro. I fisici sperano che l'esistenza e le proprietà dei quark e leptoni addizionali possano fornirci indizi sul perché in generale esistano quark e leptoni. Né l'esistenza di quark e leptoni addizionali, che non esistono in noi, né la nostra ignoranza del perché essi esistano, ci impediscono di affermare che comprendiamo di che cosa sono fatte le cose appartenenti al nostro mondo. La teoria non può ancora spiegare perché il mondo è così com'è, ma può descriverlo con successo, compreso il comportamento di tutti i quark e i leptoni.

Pur essendoci molti modi per dimostrare che una cosa è falsa, un approccio scientifico alla comprensione del mondo naturale non potrà mai dimostrare che un'interpretazione è vera. Benché gli scienziati sappiano che, in teoria, idee universalmente accettate potrebbero sempre essere dimostrate false da un nuovo esperimento, in pratica una volta che si possegga una formulazione confermata da una serie di risultati sperimentali interconnessi da una teoria, le implicazioni di tale formulazione possono essere accettate come vere. Il fatto che non si sia trovata alcuna struttura più profonda al di là del livello dei quark e degli elettroni legati da gluoni e fotoni dovrebbe farci prendere sul serio l'idea che abbiamo avuto la fortuna di vivere in un tempo in cui per la prima volta si è potuto osservare il livello ultimo della struttura della materia. Per credere che le cose stiano realmente in questi termini, abbiamo bisogno di una cornice teorica dotata di significato. Qualche fisico spera che venga formulata una teoria straordinariamente completa, una teoria la quale incorpori tutto ciò che abbiamo appreso sull'universo fisico e ci dica che molte parti in apparenza arbitrarie del quadro generale sono in realtà proprio come devono essere. Una tale

teoria è chiamata a volte « teoria di tutto » (*theory of everything*; vedi il capitolo 11, dove io la designerò col nome più modesto di « teoria primaria »). Alla fine del libro il significato di tutto ciò sarà più chiaro, ma ora vorrei trattarne in modo aneddotico.

Nel 1905, all'età di ventisei anni, Einstein pubblicò vari risultati straordinari che rivoluzionarono la fisica. Da allora, contemporaneamente allo sviluppo della teoria quantistica negli anni '20, egli svolse un ruolo centrale nel progresso della fisica. Nei successivi trent'anni, fino alla sua morte avvenuta nel 1957, egli concentrò sempre più i suoi sforzi sul tentativo, purtroppo fallito, di costruire una teoria pienamente unificata di tutte le forze e della materia.

Oggi sappiamo che il tentativo di Einstein non poteva riuscire. Egli non conosceva né i quark né i gluoni che li legano. Non sapeva che le forze elettromagnetica, debole e forte sembrano avere la stessa intensità a energie molto elevate (capitolo 9), né conosceva idee come la supersimmetria (capitolo 10), che potrebbero essere necessarie per dare un senso all'unificazione. Non era al corrente di niente di tutto questo perché non erano ancora stati fatti esperimenti in grado di scandagliare abbastanza in profondità la materia (capitolo 6). Oggi, anche se non possiamo ancora avere la certezza di possedere la giusta teoria unificata (vedi il capitolo 11) di tutte le forze note, esistono tuttavia teorie – studiate da sperimentatori e da teorici – che avrebbero potuto soddisfare completamente Einstein. La combinazione di esperimenti che continuano a non svelare strutture più profonde, e della possibilità emergente che teorie fondate sui quark e sui leptoni e sulle loro interazioni possano essere teorie pienamente unificate – anche se non sappiamo quale teoria finirà con l'affermarsi, ci sono buoni indizi che una di esse avrà infine la meglio sulle altre: vedi il capitolo 9) – induce molti di noi a pensare che la ricerca dei componenti della materia potrebbe essere finita. Questa conclusione ci fa compiere un passo avanti verso la comprensione dell'universo, del nostro posto in esso e forse di noi stessi.

2
Breve storia della fisica delle particelle

Abbiamo imparato a capire la natura prendendo l'avvio dai particolari più semplici, descrivendoli matematicamente, sperimentando, e formulando una teoria

Gli inizi della scienza

Circa 2600 anni fa ebbe inizio un'attività di ricerca che ci ha condotti infine a una comprensione largamente condivisa dell'universo naturale: una comprensione su cui concordano scienziati di ogni paese e di ogni cultura. Nel corso di questo cammino ci furono molte deviazioni dalla retta via, e almeno una volta, per lungo tempo, questa ricerca rischiò di estinguersi.

Sappiamo quando e dove questa ricerca ebbe inizio, e perché ciò avvenne proprio lì. Attorno al 600 a.C., in alcune città-stato greche della Ionia, sulla costa occidentale dell'attuale Turchia, alcuni uomini cominciarono a ragionare sulla più importante fra tutte le nostre idee sull'universo naturale: che il mondo poteva essere compreso, anziché essere un luogo magico in cui gli eventi potevano avere cause soprannaturali.

Vari elementi si combinarono allora nella Ionia per creare un ambiente in cui tale idea potesse avere origine e prosperare abbastanza a lungo per poter mettere radice. Uno di essi fu l'invenzione di una scrittura alfabetica. La prima scrittura, inventata indipendentemente in vari luoghi prima del 2000 a.C., fu una scrittura geroglifica, nella quale ogni simbolo rappresentava un'intera parola o un concetto. Un po' prima del 1000 a.C., sulle coste orientali del Mediterraneo, fu inventata la scrittura alfabetica. Questa scrittura è più astratta di quella geroglifica, e inclina la mente a un tipo diverso di logica. In Grecia, attorno all'800-700 a.C., alla forma anterio-

re di scrittura furono aggiunte le vocali, conseguendo in tal modo una scrittura alfabetica moderna.

Un altro fattore importante fu la situazione politica nella Ionia. Le città-stato erano unite in federazioni all'interno delle quali ognuna conservava una considerevole indipendenza, cosicché non c'era alcun modo effettivo per imporre una singola struttura sociale e politica. Se le idee di qualcuno non erano viste con favore in una città, potevano essere presentate in un'altra. Senza una tale libertà, difficilmente nuove idee sopravvivono. Un terzo ingrediente fu l'ubicazione delle città-stato a un crocevia fra una varietà di culture e di lingue, in un'epoca di crescente commercio e prosperità. Gli abitanti delle città-stato sentivano parlare di diverse divinità. Incontravano persone abituate a fare cose in qualsiasi modo potessero funzionare. Era quindi facile per loro dubitare di spiegazioni e regole tradizionali. La crescente prosperità delle città creò una classe più numerosa di persone che disponevano di tempo libero in misura sufficiente a sviluppare e discutere idee.

La disponibilità dell'alfabeto rese molto più accessibili la scrittura e la lettura e, in particolare, condusse a una più intensa attività legislativa per la regolamentazione della società. Al crescere della riflessione sulla formulazione di un sistema di leggi, era inevitabile che si traessero analogie con le leggi della natura.

In Grecia la religione organizzata era relativamente debole. I greci avevano piuttosto una mitologia nella quale comparivano molti dèi e dee, che spesso e volentieri erano in conflitto fra loro. Un greco che avesse avuto idee diverse sull'origine e il funzionamento del mondo non si sarebbe trovato per questo con gravi problemi.

Alcuni di questi fattori si presentarono ovviamente anche in altri luoghi, e senza dubbio vari pensatori in altre culture dovettero avere idee simili sul mondo naturale. In Grecia, però, le idee presero piede, e nel corso di qualche secolo si svilupparono vari caratteri essenziali di quella che noi oggi chiamiamo scienza. Almeno quattro idee furono molto importanti. La prima era l'idea che la natura potesse essere compresa. La seconda era la convinzione che, per descrivere la natura, si potesse e dovesse usare il linguaggio matematico. In terzo luogo, si formulò la nozione di dimostrazione matematica: si trattava di dimostrare in generale che certe proprietà valgono, diciamo, per tutti i triangoli, anziché enunciare quali proprietà valgano per alcuni particolari triangoli. E, in quarto luogo, emerse la grande intuizione che l'intera materia è formata da componenti elementari, che i greci chiamarono «atomi».

Naturalmente i greci si lasciarono sfuggire alcune cose, come l'idea di numeri negativi. Essi non possedevano in effetti una notazione comoda per i numeri. La macchinosa e paralizzante notazione matematica dei greci e dei romani fu sostituita col sistema attuale dagli arabi, che nel Medioevo furono per vari secoli i custodi della scienza antica. Anche il concetto di zero pervenne in Occidente grazie agli arabi, che lo trassero dalla matematica indiana. Fatto più importante, però, i greci si lasciarono sfuggire anche un insieme essenziale di ingredienti della scienza: le nozioni di misurazione e di verifica di idee attraverso esperimenti. Essi non andarono oltre l'idea che si potesse imparare qualcosa sul mondo semplicemente riflettendo su come esso «dovrebbe» essere.

In seguito, quando il mondo greco crollò, vennero a mancare le condizioni per fare scienza. Nessun'altra cultura coltivò la scienza nello stesso modo in cui l'avevano coltivata i greci. Nel mondo occidentale non ci fu più essenzialmente alcuna attività scientifica dal 415 d.C. – anno della morte della filosofa e matematica neoplatonica Ipazia e della chiusura della scuola di Alessandria – al Cinquecento; la scienza era effettivamente finita con i greci. Quando, nel Rinascimento, il mondo occidentale emerse da un millennio di oscurità intellettuale, i dotti si riappropriarono delle idee degli antichi greci e fecero i primi passi verso la scienza moderna. Una parte del patrimonio di idee dei greci divenne noto in Occidente grazie agli arabi, che avevano accolto la

scienza più favorevolmente di qualsiasi altra cultura dei secoli precedenti.

La scienza moderna avrebbe potuto svilupparsi anche senza il recupero delle idee dei greci perché le circostanze nell'Italia del Rinascimento erano simili a quelle della Ionia. C'era varie città-stato vicine, una relativa libertà di pensiero, persone che avevano disponibilità di tempo e di risorse, e via dicendo. La scienza ebbe in Italia uno sviluppo impetuoso, fino al tentativo messo in atto dalla Chiesa cattolica per soffocare le ricerche di Galileo. L'Italia non si riebbe tanto presto da tale stretta autoritaria, ma Francia, Inghilterra e Olanda proseguirono su quella via, e nel Seicento la scienza si affermò in troppi luoghi per poter correre il pericolo di essere distrutta da allora in poi da forze culturali o politiche.

Forse l'ingrediente cruciale che garantì la sopravvivenza della scienza dopo il Rinascimento fu l'invenzione della stampa a caratteri mobili intorno al 1450. Nel 1417 l'umanista Poggio Bracciolini portò a Firenze dalla Svizzera una copia da un antico codice del poema *De rerum natura*, scritto da Lucrezio attorno al 56 a.C. Il poema presenta le idee di Leucippo e Democrito, sostenendo che la materia è composta di « atomi », in un modo che sembra notevolmente raffinato e moderno ancor oggi. Il *De rerum natura* fu fra i primi libri stampati dopo l'invenzione dei caratteri mobili e fu diffuso in tutt'Europa, influenzando molti pensatori. Quando, nel 1543, uscì il libro di Copernico in cui si sosteneva che al centro degli orbi dei pianeti non c'era la Terra bensì il Sole, molti tentarono di soffocare le sue idee, ma grazie alla larga diffusione permessa dalla stampa non fu possibile arrestare la diffusione dell'idea. Il torchio tipografico fu il primo sviluppo tecnologico che svolse un ruolo importante nell'estendere la libertà umana: il suo ruolo, in tempi più vicini a noi, è stato integrato dal fax, dalla radio via satellite, dalla televisione e, ultimamente, da Internet.

Gli inizi della scienza moderna: misurazione e sperimentazione

Il ruolo essenziale della misurazione e della sperimentazione cominciò a essere inteso in modo chiaro solo nel Cinquecento, con l'emergere di scienziati come Niccolò Copernico, Tycho Brahe, Keplero e Galileo. Questi pionieri della scienza moderna cercarono di spiegare le regolarità osservate in cielo e di comprendere i moti celesti. Particolarmente le misurazioni del moto dei pianeti, e soprattutto di Marte, eseguite verso la fine del Cinquecento da Brahe, ebbero conseguenze straordinarie. Brahe fu il primo a credere nell'importanza di misurare fenomeni naturali con la massima precisione possibile, nella certezza che la precisione avrebbe condotto a capirli meglio, e aveva ragione.

Una fra le scoperte più importanti di Brahe fu quella di una stella nuova apparsa nel 1572. Era in realtà una supernova, fenomeno di cui egli non poteva ovviamente aver nozione. Per un anno e mezzo ne osservò le variazioni di luminosità, finché la stella si indebolì tanto da sparire alla vista. Avendo eseguito misurazioni esatte, Brahe poté dimostrare che si trattava realmente di una stella lontana in cielo e non di un fenomeno « meteorologico ». La supernova di Brahe fu visibile in tutt'Europa, cosicché la notizia che si trattava effettivamente di una stella suscitò grande interesse. Nell'Europa cristiana era universalmente accettata la nozione aristotelica che il cielo fosse eterno e immutabile. Questa fu la prima prova del contrario. La tesi di Brahe fu verificata da un gran numero di astronomi (nello stesso modo in cui si possono verificare tutti i risultati della scienza). La scoperta di mutamenti in cielo ebbe una grande importanza al fine della liberazione della mente umana dalle pastoie di secoli di dogmi sul mondo naturale e sui suoi meccanismi.

Usando i dati raccolti da Brahe, e in parte liberato proprio grazie all'opera dell'astronomo danese dalla visione del mondo dominante, Keplero poté dimostrare per mezzo di calcoli lunghi e complessi che le orbite dei pianeti non erano circo-

lari bensì ellittiche. L'asse maggiore era però più lungo solo di poco dell'asse minore, cosicché fu possibile scoprire la differenza solo grazie all'esattezza delle nuove misurazioni di Brahe. Keplero riuscì a formulare la prima legge veramente matematica della natura, mettendo in relazione fra loro diverse proprietà osservabili dell'orbita di un pianeta. In un certo senso, proprio quel momento, il 1609, segnò l'inizio della scienza moderna: una volta che ci si rese conto che esisteva una formula che descriveva realmente l'orbita di un pianeta, non si poté più rinunciare a una descrizione matematica dei fenomeni naturali.

Alcuni storici preferiscono far cominciare la scienza moderna con l'opera di Galileo, che visse nello stesso periodo. Anche Galileo sviluppò formule che descrivevano moti, ma riguardavano moti sulla Terra e furono un risultato diretto di sperimentazioni. Per quanto possa sembrare facile a noi oggi, il problema della comprensione e descrizione del moto fu fra i più difficili da risolvere: occorsero più di duemila anni di ricerche per trovarne la giusta soluzione. Galileo definì con cura velocità e accelerazione, e trovò la relazione esistente fra loro misurando ripetutamente la velocità e l'accelerazione di una palla fatta rotolare lungo un piano inclinato. Fu questa la prima volta in cui una formula matematica fu dedotta da esperimenti pianificati, anziché dall'osservazione di fenomeni osservati in natura.

Galileo è forse il primo individuo nella storia a poter essere riconosciuto come uno scienziato in senso moderno (con la possibile eccezione di alcuni greci antichi). Egli comprese la possibilità di studiare i fenomeni analizzandoli in termini dei loro componenti più semplici. Come tutti i fisici moderni ebbe il desiderio di sviluppare una grande teoria che abbracciasse tutti i fenomeni, ma capì, come nessun altro prima di lui, che si richiedeva un approccio diverso da quello tradizionale, e che era necessario concentrarsi sui problemi più semplici, procedere passo passo ed eseguire esperimenti. In lui si trovarono così finalmente riuniti tutti gli aspetti essenziali di un metodo scientifico per lo studio della natura. Da allora in

poi la scienza ha proceduto con una rapidità sempre crescente verso la comprensione della natura.

Da allora, e specialmente nel nostro secolo, la tentazione di formulare una grande «teoria di tutto» (capitoli 11 e 13) ha dominato il pensiero di alcuni fra gli scienziati migliori. Einstein, e in seguito Heisenberg, spesero anni in questo tentativo, benché chiaramente non avessero fondamenta solide su cui costruire. Dopo il successo della teoria standard, però, alcuni teorici si sono resi conto che erano forse finalmente disponibili gli ingredienti richiesti per costruire una teoria più unificata. In effetti, più di tre secoli e mezzo dopo Galileo, è oggi diventato possibile passare dal riduzionismo (il processo consistente nello scomporre le cose, nel tentativo di definirne i componenti con una precisione di dettaglio sempre crescente) all'unificazione (la considerazione delle cose come un tutto). La ricerca di una teoria unificata è diventata oggi un argomento di studio legittimo, esplicitamente perseguito da decine di fisici, ma se gli scienziati non avessero seguito per secoli una strategia riduzionistica noi non avremmo potuto pervenire a questo stadio.

Il mio intento in questo capitolo è stato quello di descrivere molto in breve in che modo si è sviluppata la fisica. La cosa più importante da capire è che è stata essenziale l'*invenzione* dei metodi della scienza. La scienza avrebbe anche potuto non nascere mai. Essa è molto fragile, richiedendo molti fattori, come la possibilità di riflettere liberamente sui meccanismi del mondo, le risorse per poter sperimentare, e il tempo per pensare e lavorare.

Tre vie verso la teoria di oggi

I componenti

Il processo che condusse direttamente allo sviluppo della teoria standard e alla presente comprensione delle particelle materiali cominciò quindi poco meno di quattro secoli fa.

Esso seguì tre vie parallele, consistenti nello scandagliare i componenti della materia, nell'imparare quali forze ne determinino l'interazione, e nel trovare le regole per calcolare che cosa accade. Noi possiamo ricostruire questi percorsi sino a oggi, a cominciare dall'esame del modo in cui abbiamo imparato a identificare i componenti della materia.

All'inizio del Seicento il filosofo e scienziato francese Pierre Gassendi lesse il poema di Lucrezio ed esortò vari dotti in tutt'Europa a fare altrettanto. Egli sottolineò il bisogno di sperimentare per scoprire gli atomi e scrisse vari libri in cui espose i suoi risultati e le sue opinioni. In Inghilterra Robert Boyle studiò sperimentalmente in che modo l'aria veniva compressa in un tubo sotto varie condizioni, e nel 1660 pubblicò i risultati di esperimenti che potevano essere spiegati facendo l'ipotesi che l'aria fosse formata da atomi. Per più di un secolo gli scienziati europei raccolsero dati su molti materiali e processi chimici diversi. Infine furono accumulate abbastanza informazioni da permettere a John Dalton di scrivere un libro, edito nel 1808, in cui si mostrava che i risultati di moltissime reazioni chimiche potevano essere compresi ipotizzando l'esistenza di un certo numero di elementi, ognuno composto dal proprio genere di atomi. La ricerca degli elementi chimici procedette per l'intero Ottocento, nel corso del quale un numero sempre maggiore di scienziati venne ad accettarne l'esistenza. Attorno al 1870 il russo Dmitrij Ivanovič Mendeleev riuscì a organizzare gli elementi noti in una tabella che va sotto il nome di sistema periodico degli elementi. Sulla base di regolarità connesse alla struttura di questa tabella, Mendeleev poté predire l'esistenza di vari elementi ignoti e sostenere che certe proprietà di altri elementi erano state misurate male. Quando le sue previsioni furono confermate, l'idea della reale esistenza degli atomi acquistò una considerevole credibilità.

Press'a poco nello stesso tempo delle ricerche di Mendeleev in chimica, lo scozzese James Clerk Maxwell, e in seguito l'austriaco Ludwig Boltzmann, riuscirono a spiegare le proprietà dei gas, compresi calore e temperatura, fondandosi

sull'intuizione che i gas fossero composti di atomi. Per esempio, una temperatura superiore corrisponde a un moto più veloce degli atomi. Queste ricerche riuscirono a convincere altri dell'esistenza degli atomi. Tuttavia, essendo gli atomi troppo piccoli per poter essere osservati, la maggior parte degli scienziati non credevano nella loro esistenza.

Infine, nel 1905 Einstein sostenne che un fenomeno scoperto nel 1827 da Robert Brown (e chiamato perciò in suo onore moto browniano) forniva una prova diretta dell'esistenza degli atomi. Se si osservano al microscopio minuscoli granelli di polline in acqua, si vedrà che essi si muovono di continuo e in modo casuale. Einstein disse che il moto dei granelli di polline era causato da un costante bombardamento da parte delle molecole d'acqua. Fatto più importante, Einstein sviluppò formule teoriche implicanti le dimensioni delle molecole d'acqua, il diametro dei granelli di polline, la temperatura e le distanze percorse dal polline in un tempo dato. Nel 1908 Jean-Baptiste Perrin, a Parigi, dimostrò sperimentalmente l'assoluta correttezza delle previsioni di Einstein. Dopo 2300 anni l'esistenza degli atomi era dunque accettata pressoché universalmente (purtroppo però troppo tardi per Boltzmann: vedi il Prologo). E per la prima volta era stata dedotta la grandezza di una molecola: il suo diametro risultò essere di un centomilionesimo di centimetro circa.

Gli scienziati non ebbero molto tempo per godersi il grande senso di felicità e di bellezza che può dare la comprensione di una parte della natura. Già nel 1895 la scoperta del decadimento radioattivo (e i risultati di altri esperimenti) avevano cominciato a lasciare intendere che gli atomi chimici (la parte più piccola di ogni elemento che è ancora riconoscibile come quell'elemento) erano composti da altre cose, contenendo chiaramente, in particolare, la particella a noi nota oggi come l'elettrone. Nel 1910 Ernest Rutherford e colleghi diedero inizio a una serie di esperimenti sparando proiettili (forniti dal decadimento radioattivo di atomi) contro atomi d'oro. Da quegli esperimenti derivò l'analogia già citata della pesca e del suo nocciolo. Secondo tale analogia, si

potrebbe apprendere l'esistenza del nocciolo senza tagliare la pesca, sparando semplicemente piccoli proiettili contro di essa; mentre una parte dei proiettili attraversano la polpa senza incontrare resistenza, quelli deviati in diverse direzioni dimostrerebbero l'esistenza, all'interno della pesca, di un nocciolo duro. A volte i proiettili di Rutherford sparati contro atomi rimbalzavano, ed egli riuscì a descrivere l'effetto matematicamente e a determinare che gli atomi avevano un nucleo duro con un diametro 10.000 volte minore di quello dell'atomo stesso. Anche l'atomo era dunque composto!

Nel 1926, con lo sviluppo della teoria quantistica, che condusse a spiegazioni dettagliate delle proprietà degli atomi e del sistema periodico degli elementi, divenne chiaro che ogni elemento chimico aveva un atomo il cui nucleo conteneva un diverso numero di protoni, da uno nel caso dell'idrogeno a novantadue in quello dell'uranio. Il confronto di tale informazione col peso di ciascun elemento condusse alla conclusione che doveva esistere un'altra particella, molto simile al protone ma priva di carica elettrica. Il neutrone fu infine scoperto direttamente nel 1932.

Tutti i nuclei sono composti di protoni e neutroni, e tutti gli elementi chimici constano di atomi: nuclei attorno a cui orbitano elettroni. Una volta scoperto il neutrone, era forte la tentazione di supporre che i componenti fondamentali fossero ormai stati trovati e che tutta la materia fosse composta di protoni, neutroni ed elettroni. Ben presto emersero però almeno tre ragioni per considerare insoddisfacente quest'opinione. Innanzitutto, una previsione sulle proprietà di protoni e neutroni non concordava con gli esperimenti. Protoni e neutroni si comportano come piccoli magneti. La teoria quantistica prevede l'intensità della forza magnetica per ogni particella elementare, ma protone e neutrone si comportavano come magneti più intensi del previsto, implicando così che non fossero elementari; infine le loro proprietà magnetiche sarebbero state spiegate in termini di quark. In secondo luogo, dopo la seconda guerra mondiale fu costruito lo Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) per scandagliare protoni e neutroni usando elettroni come proiettili, in esperimenti analoghi a quelli con cui Rutherford aveva scoperto il nucleo. Già quei primi esperimenti dimostrarono che protoni e neutroni erano particelle composte e non puntiformi, anche se i proiettili usati (gli elettroni) non avevano un'energia sufficiente per permettere agli sperimentatori di scoprire di più sulla loro struttura reale. In terzo luogo, una varietà di esperimenti condussero alla scoperta di un gran numero di particelle simili al neutrone e al protone, le quali furono chiamate collettivamente « adroni » (in questa categoria rientrano anche i neutroni e i protoni). Quando i fisici immaginano i componenti basilari della materia, pensano che debbano esistere solo poche particelle, a partire dalle quali se ne possano costruire molte altre. Negli anni '50 il numero degli adroni era ormai troppo grande per poter pensare che alcuni di loro fossero elementari e potessero essere i componenti di altri. Si cominciarono allora a cercare spiegazioni più semplici per il gran numero di adroni.

Infine, nel 1968 una nuova serie di esperimenti allo SLAC, che utilizzavano elettroni ad alta energia, scoprì l'esistenza di quark nei protoni e nei neutroni. Il segnale fu molto simile a quello trovato parecchio tempo prima da Rutherford. Come in quel classico esperimento, troppi proiettili rimbalzavano invece di passare oltre, cosicché era chiaro che dovevano colpire qualcosa di duro, come il nocciolo della pesca. Richard Feynman e James Bjorken produssero analisi le quali mostravano come avrebbero dovuto comportarsi gli elettroni che rimbalzavano qualora avessero colpito particelle puntiformi (i quark), e le loro previsioni furono confermate sperimentalmente. Alla metà degli anni '60 Murray Gell-Mann e George Zweig avevano sostenuto indipendentemente che il gran numero degli adroni avrebbe avuto una spiegazione semplice qualora essi fossero stati composti di quark. Ben presto i teorici dedussero che i quark immaginati come componenti degli adroni e quelli scoperti allo SLAC potevano essere gli stessi, e i quark cominciarono a sembrare reali.

All'inizio degli anni '70 i nuovi sviluppi cominciarono ad

assumere un ritmo incalzante. Si vide che le teorie fondate sui quark e sugli adroni acquistavano un senso anche in altri modi. Il passo avanti finale, quello che condusse a un'accettazione quasi completa dei quark, fu la scoperta di un nuovo quark, il quark «incanto» (*charm*), nel novembre 1974, contemporaneamente al Brookhaven National Laboratory e allo SLAC, da parte di due gruppi, diretti rispettivamente da Samuel C.C. Ting e da Burton Richter. Altri membri del gruppo dello SLAC, Martin Perl e collaboratori, trovarono alla stessa data il leptone tau (τ): un'altra scoperta notevole.

Le forze

Passeremo ora, lasciando da parte il racconto delle scoperte di particelle e strutture, a ricostruire lo sviluppo storico della nostra conoscenza delle forze. Prima di Newton l'idea di forza non era formulata in modo chiaro. Tutti, ovviamente, sapevano che le mele mature cadono dagli alberi, e Galileo sapeva calcolare la traiettoria di una palla da cannone, mentre Aristotele aveva negato che il moto «violento» di proiezione potesse combinarsi col moto «naturale» di caduta (figura 2.1). Si conoscevano anche l'elettricità statica e il magnetismo. Newton fu però il primo a definire in modo chiaro l'idea di una forza di attrazione fra due oggetti a piacere – la forza gravitazionale – e più in generale a definire in modo esplicito la nozione di forza. La bella dimostrazione di Newton che il moto della Luna (un moto celeste) e i moti sulla Terra (simboleggiati dalla caduta della mela) erano determinati dalle stesse leggi ebbe un impatto ideale che andava ben oltre le sue conseguenze scientifiche dirette: essa stabilì che gli oggetti in cielo erano soggetti alle stesse leggi cui obbedivano gli oggetti sulla Terra, e suggerì che le stesse leggi della natura potessero descrivere qualsiasi cosa, in qualsiasi luogo. Se le leggi di Newton si applicavano ovunque, forse l'universo era un luogo ordinato, e non casuale come sembrava essere. Inoltre, l'apparente universalità delle leggi di Newton suggerì ad alcuni pensatori del Settecento che dovessero es-

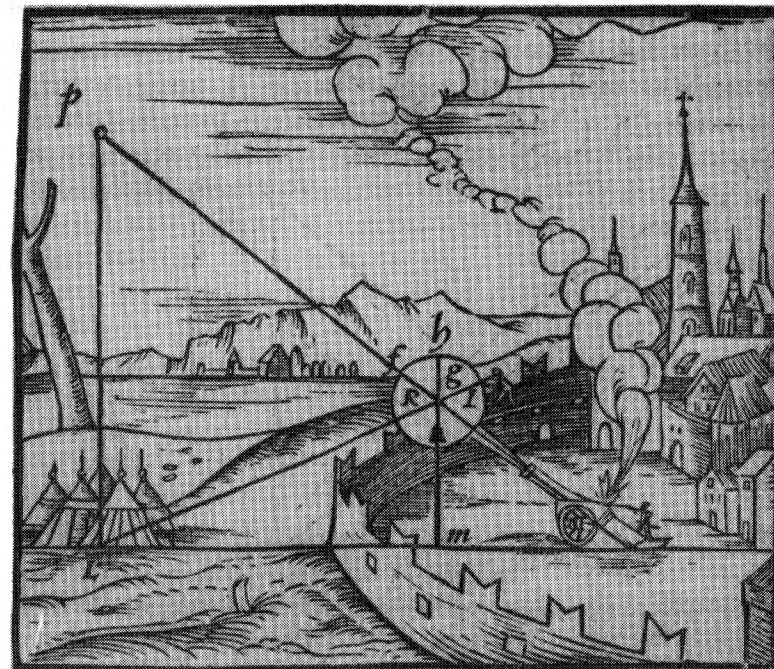



Figura 2.1. La teoria aristotelica del moto prediceva per una palla da cannone la traiettoria qui illustrata: una prima parte rettilinea, nella direzione della canna, dovuta al moto violento, e una seconda parte, verticale, dovuta al moto di caduta. Galileo sapeva che la traiettoria era una parabola (Per gentile concessione della Royal Astronomical Society Library)

sere universali anche altre cose, come i diritti politici e umani.

Un'altra importante conseguenza concettuale dell'opera di Newton derivò dai tentativi di capire come operasse la forza di gravità. Benché Newton avesse spiegato compiutamente come calcolarne gli effetti, il meccanismo sottostante era misterioso, tanto più in quanto sembrava richiedere che la forza agisse istantaneamente su lunghe distanze; era il cosiddetto problema dell'«azione a distanza». Newton si rendeva ben conto che la sua formulazione delle leggi della gravità e del moto non era invalidata dal fatto di non comprenderne il meccanismo. Sarebbero trascorsi 150 anni pri-

ma che Michael Faraday e altri, fra il 1820 e il 1830, cominciassero a capire che ogni corpo crea dei campi nello spazio: un campo gravitazionale, cui si aggiunge un campo elettrico se il corpo ha una carica elettrica, e un campo magnetico se è magnetizzato. Ogni corpo percepisce i campi gravitazionale, elettrico e magnetico creati dagli altri corpi e risponde in modi determinati dalla propria massa, carica elettrica e magnetismo. Il problema dell'azione a distanza non fu pienamente risolto fino all'inizio del Novecento con Einstein, quasi due secoli e mezzo dopo il suo primo riconoscimento.

Quando Mozart scriveva alcuni suoi capolavori, al tempo della Rivoluzione americana, ben poco si sapeva sull'elettricità e sul magnetismo che non fosse già noto ai greci. C'era stata assai poca sperimentazione sui fenomeni elettrici e magnetici, e perciò poco progresso. Benjamin Franklin fu uno fra i primi a compiere esperimenti con l'elettricità. Un grande progresso fu realizzato nel 1821, quando lo scienziato danese Hans Christian Oersted dimostrò che, se in un filo scorre una corrente elettrica, un ago magnetizzato nelle vicinanze si muoverà. Quel risultato dimostrò immediatamente l'esistenza di una correlazione fra elettricità e magnetismo. Nel decennio successivo André-Marie Ampère in Francia, Joseph Henry in America e soprattutto Michael Faraday in Inghilterra esplorarono le relazioni fra elettricità e magnetismo e trovarono una varietà di fenomeni che davano un quadro unificato in termini di campi elettrici e magnetici di ogni oggetto e mostravano come questi campi cambiavano col tempo. Infine Maxwell, con una straordinaria creatività intellettuale, sintetizzò tutto ciò che si sapeva sull'elettricità e sul magnetismo in un insieme di equazioni (note ovviamente come le equazioni di Maxwell), che descrivevano la forza elettromagnetica unificata.

Che cosa si intende quando si dice che elettricità e magnetismo sono unificati? Gli esperimenti mostrarono che una carica elettrica in movimento dava origine a un campo magnetico, indistinguibile dal campo magnetico di una calamita di forma appropriata, e che un campo magnetico variabile

dava origine a un campo elettrico indistinguibile da quello di un insieme appropriato di cariche elettriche. Maxwell trovò un insieme di equazioni che permettevano di calcolare tutti i diversi effetti elettrici e magnetici a partire da un'entità basilare: il « campo elettromagnetico ».

A questo punto della storia, tutte le forze note (che si riducevano allora alla gravità e all'elettromagnetismo) avevano ricevuto una compiuta forma matematica. I fisici più informati sapevano però che molte cose rimanevano da fare: provare l'esistenza degli atomi e studiare le forze alla scala atomica e, a distanze maggiori, capire la sorgente dell'irradiazione solare o che cosa fossero esattamente le stelle. Molti sapevano che, in Germania, Joseph von Fraunhofer aveva osservato la luce del Sole e delle stelle con prismi e aveva visto nei loro spettri righe molto intense. Altri avevano notato che, quando si riscaldavano certi elementi chimici e se ne osservava la luce attraverso lo spettro, essi risultavano emettere luce di particolari colori. Se gli atomi fossero stati oggetti privi di struttura, non avrebbero dovuto emettere luce (le cose prive di strutture non possono fare niente da sé), e tanto meno un insieme di colori diverso e caratteristico per ciascun elemento. Se avevano una struttura, quali forze potevano essere all'opera? Maxwell sottolineò questi problemi nell'articolo sugli atomi da lui scritto per l'*Encyclopaedia Britannica* negli anni '70 dell'Ottocento. Risultò poi che il comportamento degli atomi è determinato dalla forza elettromagnetica, ma questa verità non sarebbe stata compresa fino allo sviluppo della teoria quantistica.

Fra il 1870 e il 1880 non c'era alcun sospetto della forza debole o della forza « nucleare », poiché queste operano solo a distanze dell'ordine della grandezza del nucleo atomico, e la scienza non aveva ancora scandagliato la natura così in profondità. Tali forze svolgono ruoli essenziali anche nel funzionamento delle stelle, ma in un modo così sottile che non sarebbe stato possibile apprendere qualcosa su di esse studiando la fisica stellare.

Le prime manifestazioni della forza debole furono scoper-

te nel 1895 dallo scienziato francese Henri Becquerel. Egli si accorse che una lastra fotografica conservata vicino a un pezzetto d'uranio era rimasta impressionata. All'inizio nessuno sapeva come spiegare questo fenomeno, ma studi compiuti nell'arco di un decennio da Becquerel, da Marie e Pierre Curie e da altri mostrarono che questo effetto non diminuiva quando l'uranio era stato conservato per molto tempo, e che un pezzo di radio poteva ridurre in vapore in pochi minuti un pezzo di ghiaccio della stessa grandezza, mentre il radio sembrava restare immutato. Elettromagnetismo e gravità non potevano spiegare tali effetti, cosicché doveva essere all'opera una nuova forza. Le proprietà della forza debole furono apprese solo molto lentamente. Negli anni '30 del Novecento Hans Bethe mostrò che essa svolge un ruolo chiave nell'irradiazione del Sole (e di tutte le stelle). Molti esperimenti, compiuti dagli anni '30 agli anni '70, diedero risultati che condussero a una descrizione più generale della forza debole, ma il suo status teorico rimase insoddisfacente fino a quando essa non fu incorporata nella teoria standard, all'inizio degli anni '70. Nel capitolo 4 spiegherò più diffusamente questa forza, il modo in cui influisce sul mondo naturale, e la ragione per cui viene chiamata « debole ».

Il riconoscimento della forza « nucleare » avvenne invece subito dopo la scoperta del nucleo da parte di Rutherford nel 1911, e dopo la comprensione del fatto che ogni elemento chimico ha un nucleo contenente un diverso numero di protoni. Divenne chiaro che doveva essere all'opera una qualche nuova forza nucleare per legare i protoni, di carica positiva, contro la loro repulsione elettrica, dal momento che cariche dello stesso segno si respingono: la gravità era troppo debole per mantenere la coesione del nucleo.

Nel 1915, quindi, essendo state « osservate » la forza debole e la forza « nucleare », si conoscevano quattro forze diverse. Ben poco cambiò da allora nella nostra comprensione delle forze fino alla formulazione della teoria standard negli anni '70, quando si verificarono tre sviluppi importanti. Innanzitutto, la descrizione dell'interazione debole fu formulata in modo tale da includere compiutamente le richieste delle regole della teoria quantistica e della relatività ristretta, in luogo dell'insieme grossolano e contraddittorio di regole che erano state accettate in precedenza. In secondo luogo, come nell'Ottocento l'elettricità e il magnetismo erano risultati essere due diverse manifestazioni di un'unica forza (ed erano stati unificati nell'elettromagnetismo), così ora gli americani Sheldon Glashow e Steven Weinberg, e il pakistano Abdus Salam, direttore dell'Imperial College di Londra e del Centro Internazionale di Fisica Teorica di Trieste, riuscirono a mostrare che c'era un senso in cui le forze elettromagnetica e debole erano manifestazioni diverse di un'unica forza sottostante, la forza « elettrodebole ». Infine divenne chiaro che la forza che agisce fra protoni e neutroni, la forza « nucleare », era in realtà un aspetto della più fondamentale forza forte.

Nella vita quotidiana la maggior parte delle « forze » sono effetti, come trazioni e spinte, esercitati da una parte del mondo che ci circonda su un'altra parte. Dopo Newton i fisici impararono a definire una forza come qualcosa in grado di cambiare lo stato di moto di un oggetto. Il concetto di forza si è evoluto ancor più da allora. Secondo la definizione moderna, una forza è qualsiasi interazione fra due oggetti. Tutte le osservazioni sperimentali possono essere spiegate dalle quattro forze: gravità, forza debole, forza elettromagnetica e forza forte. L'interazione può essere semplice come una spinta o una trazione, ma può essere molto più complicata, implicando per esempio anche la creazione o distruzione di particelle. L'interazione elettromagnetica può fare varie cose sorprendenti, come causare l'attrazione fra oggetti di carica elettrica di segno opposto e la repulsione fra oggetti con cariche dello stesso segno. La forza elettrica accelera una particella nella direzione del suo movimento, mentre la forza magnetica la spinge perpendicolarmente a tale direzione. La forza forte non ha quasi alcun effetto sui quark quando sono molto vicini fra loro, ma se cercano di separarsi li trattiene con tale vigore che essi non riescono mai ad allontanarsi fra

loro di più di 10^{-12} cm. L'interazione debole non ha alcun effetto nella nostra vita quotidiana, ma alla scala subatomica trasforma elettroni in neutrini e quark su in quark giù. Tutti questi caratteri sono spiegati e previsti dalle equazioni della teoria standard.

Le regole

Finora, in questo capitolo, abbiamo visto come si è sviluppata la nostra comprensione dei componenti della materia e delle forze che agiscono su di essa. Dobbiamo ora esaminare, in conclusione, lo sviluppo delle regole per calcolare l'effetto delle forze. La prima enunciazione di una regola in proposito fu la famosa « seconda legge » di Newton. Essa dice che qualsiasi *oggetto* (per esempio un atomo, una particella, una palla da baseball) di massa $\boldsymbol{m}$, a cui venga applicata una forza $\boldsymbol{F}$, subirà un'accelerazione $\boldsymbol{a}$, e la *regola* che mette in correlazione queste quantità è $\boldsymbol{F} = \boldsymbol{m} \times \boldsymbol{a}$. Senza quest'equazione – la seconda legge di Newton – non sapremmo come calcolare l'accelerazione, anche se conoscessimo la massa dell'oggetto e sapessimo quale forza fu applicata. Ma non potremmo calcolare l'accelerazione non sapendo la forza o la massa, neppure conoscendo l'equazione.

Nel corso del tempo furono sviluppate altre leggi empiriche, ma per altri duecento anni non ci furono mutamenti fondamentali nella nostra comprensione delle regole. Poi, all'inizio del XX secolo, Einstein sottolineò che, per oggetti in moto a velocità prossime a quella della luce, la legge di Newton non forniva i risultati corretti; in questo caso si dovevano aggiungere le richieste della « relatività ristretta ». Press'a poco nello stesso tempo, i problemi insorti nella comprensione degli atomi mostrarono che la legge di Newton e le equazioni di Maxwell perdevano ogni validità a distanze molto piccole. Negli anni '20 il problema della comprensione dell'atomo fu risolto grazie all'introduzione di nuove regole, incorporate in una struttura nota come la « teoria quantistica ». Secondo queste regole una nuova equazione, la cosiddetta equazione di Schrödinger, sostituì la legge di Newton. Infine, verso la fine degli anni '20 Paul Dirac presentò l'equazione che porta il suo nome, la quale combinava i vincoli della relatività ristretta e della teoria quantistica.

Oggi esistono versioni moderne delle regole che sono tecnicamente assai più potenti e che ci permettono di risolvere le equazioni in modo molto più efficace, ma le basi di queste regole furono gettate già negli anni '30. Si può capire l'evoluzione delle regole immaginando vari limiti. Prendendo l'avvio dall'equazione di Dirac, e procedendo verso il « limite non relativistico », dove nessuna particella del sistema si muove a una velocità prossima a quella della luce, si ottiene l'equazione di Schrödinger della teoria quantistica. Di qui si può passare a una situazione in cui gli effetti quantistici non siano importanti, considerando problemi in cui non ci sia niente di così piccolo come un atomo; ne risulta allora la legge di Newton. Questa legge non è corretta in assoluto, ma si applica solo in un ambito limitato di velocità e di grandezze. Quest'ambito è però alquanto grande, essendo compreso fra dimensioni atomiche e dimensioni galattiche, e coprendo tutte le velocità conseguibili da qualsiasi oggetto terrestre prima di questo secolo. È spesso accaduto, nello sviluppo storico della scienza, che risultati anteriori venissero incorporati e ampliati in un risultato più generale. Quel che c'è di nuovo nella teoria standard è che si applica a tutte le velocità possibili, e fino al confine del nostro universo, e a ritroso nel tempo fino a una piccolissima frazione di secondo dopo il big bang. In questo immenso dominio essa è destinata a conservare per sempre la sua validità. Noi ci attendiamo tuttavia che la teoria standard venga estesa e inclusa in una teoria ancora più basilare, come vedremo nei capitoli 7-11.

La teoria quantistica e la relatività ristretta furono due scoperte sorprendenti, e condussero a regole molto diverse da quelle che sostituivano. Storici e filosofi le caratterizzarono perciò come rivoluzioni, e descrissero la storia dello sviluppo scientifico come periodi di scienza normale seguiti da rivoluzioni. In realtà le scoperte delle particelle e delle forze

nel secolo scorso non si conciliano molto bene con questa visione della storia. C'è stato invece un processo costante di sviluppo di esperimento e di teoria, in cui ogni stadio suggerì gli stadi seguenti. Non ci fu alcuno stadio discontinuo o rivoluzionario, tranne forse l'introduzione della nozione che oggi finalmente conosciamo i componenti dell'atomo e le loro interazioni.

3
La ricerca in fisica delle particelle

La formazione e il lavoro di un fisico delle particelle si fondano sull'istruzione, il finanziamento e la comunicazione

I FISICI delle particelle, che non sono mai dei Frankenstein (la fantasia è davvero più strana della realtà), e raramente degli Einstein, sembrano essersi finalmente scossi di dosso il vecchio stereotipo del professore con la testa fra le nuvole, e pare vengano considerati oggi con benevolenza, anche se a volte con un po' di ironia, come capaci di fornire contributi alla cultura contemporanea. Teorie anteriori, come la relatività ristretta, e più recenti, in cui compaiono idee come la materia oscura, possono darci il brivido dell'ignoto e del possibile. La vita quotidiana comprende però i rigori dell'istruzione e le difficoltà ancora peggiori dei finanziamenti. Il progetto del Supercollisore a magneti superconduttori (SSC), che richiedeva il massimo finanziamento nella storia della ricerca, fu concepito nel 1982, ma tristemente smantellato nel 1993. Esso attrasse una grande attenzione verso la fisica delle particelle, eccitando l'immaginazione del pubblico; il suo annullamento rimane un motivo di tristezza e di apprensione per coloro che amano avventurarsi al di là dei limiti di ciò che è noto.

L'istruzione

Gli studiosi della fisica delle particelle sono esploratori, ma anziché viaggiare verso nord, sud, est o ovest, la loro frontiera è verso il microcosmo – le particelle che formano il nostro mondo – e, più recentemente, verso il macrocosmo: verso le particelle invisibili che potrebbero riempire lo spazio nella forma di materia oscura. Poiché cercano di esplorare l'igno-

to, noi tendiamo ad attribuire loro una combinazione di flessibilità e di rigore: una capacità di vedere e di comprendere ciò che non era stato visto o analizzato prima.

Per diventare un fisico delle particelle si richiedono diversi anni di addestramento e di apprendistato successivi alla laurea. Alcuni studenti di fisica affrontano il dottorato senza sapere quale specialità sceglieranno (se fisica atomica, fisica dei materiali ecc.) e finiscono poi per gravitare verso la fisica delle particelle, ma i più sono attratti in tale direzione fin dal principio. Ancor prima di frequentare l'università, mi capitò di leggere un bel libro di Lincoln Barnett.* Una frase in copertina diceva: « Una spiegazione chiara, concisa e affascinante delle teorie di Einstein, di come furono sviluppate e del modo in cui hanno cambiato il corso del pensiero moderno ». Da allora seppi che volevo studiare tali idee. I corsi di fisica all'università sembravano però avere poco a che fare con una migliore comprensione dell'universo. C'erano leve, condensatori e lenti, mentre io volevo sapere di che cosa siamo fatti e quale sia realmente il nostro posto nell'universo. Infine, da bravi professori come Victor Weisskopf e Francis Low, entrambi al Massachusetts Institute of Technology, imparai che c'era una connessione: la fisica è una struttura altamente unificata, e occorre studiarla da ogni direzione per comprenderne il significato generale.

Gli studenti cominciano a partecipare marginalmente alla ricerca in fisica delle particelle già all'inizio del corso di dottorato. Al terzo anno sono pronti a lavorarvi quasi a tempo pieno. Un numero sempre minore di fisici possiede conoscenze sufficienti per compiere esperimenti e padroneggiare al tempo stesso una teoria sempre più complessa. L'ultima persona esperta su entrambi i versanti fu probabilmente Enrico Fermi – la cui attività si colloca per la maggior parte negli anni '50 – dal quale prese il nome il Fermilab e che

* Lincoln Kinnear Barnett, *The Universe and Dr. Einstein*, Time-Life Books, Alexandria, Virginia, 1977, rist. ivi 1982. (*N.d.T.*)

ha lasciato un'impronta considerevole in fisica. Sperimentatori e teorici seguono corsi di studi piuttosto diversi.

Gli esperimenti richiedono necessariamente attrezzature all'avanguardia della tecnologia; queste attrezzature sono di solito grandi e complesse, e la loro costruzione richiede molto tempo. Oggi la maggior parte dei fisici delle particelle esplora l'ignoto con enormi « microscopi »: gli acceleratori e i loro rivelatori. Altri lanciano rivelatori su palloni aerostatici nell'alta atmosfera, o li situano in profondità nel sottosuolo in gallerie e miniere, alla ricerca della materia oscura, dei neutrini solari o del decadimento dei protoni.

Idealmente, i dottorandi in fisica sperimentale collaborano nella progettazione e costruzione di rivelatori con vari altri laureati, con ricercatori che hanno conseguito da poco il dottorato, con tecnici, ingegneri e fisici esperti, appartenenti a varie università e laboratori. La maggior parte degli esperimenti vengono compiuti in acceleratori situati in alcuni laboratori nazionali. Quando tutto è pronto, si colloca un rivelatore in un fascio di particelle, e si studiano le collisioni risultanti. L'esperimento dura di solito per vari anni, a volte con potenziamenti delle macchine per migliorarne la capacità di studiare fenomeni interessanti inattesi. Per far sì che tutto continui a funzionare bene, e per risolvere prontamente eventuali problemi, gli sperimentatori sono presenti con turni diversi ventiquattr'ore al giorno, sette giorni la settimana, finché l'esperimento è in corso.

Una volta raccolti i dati, li si deve studiare e analizzare per vedere quanto si possa comprendere alla luce della conoscenza esistente e che cosa ci sia eventualmente di nuovo. Per trovare effettivamente qualcosa di nuovo si richiedono sapere e anche fortuna. Per poter dare un'interpretazione fisica dei dati registrati dal rivelatore occorrono programmi per computer molto estesi, e il dottorando partecipa anche a quest'analisi.

Infine i candidati conseguono il loro PhD, di solito sei o sette anni dopo la laurea. Alcuni abbandonano la ricerca di base per posti di lavoro in cui mettono a frutto l'alta tecno-

logia e le capacità di analisi che hanno acquisito; vengono assunti da società di alta tecnologia, da aziende produttrici di hardware e software per computer, da laboratori governativi che si dedicano ad altre branche della fisica, e persino da aziende di Wall Street e affini, che apprezzano l'analisi e le capacità di matematica applicata. Quelli che rimangono in fisica delle particelle diventano di solito professori aggregati. I ricercatori si trovano, scientificamente, in una situazione meravigliosa. Possono dedicarsi a tempo pieno allo studio di argomenti di fisica dopo avere padroneggiato da studenti le tecniche essenziali, senza essere distratti dalla necessità di cercare finanziamenti per gli esperimenti: una necessità a cui devono far fronte gli sperimentatori anziani. C'è però anche un rovescio della medaglia. Poiché i dati sperimentali vengono registrati in laboratori centrali, mentre i posti di lavoro sono per lo più in università, lo sperimentatore deve trascorrere molto tempo lontano da casa e dalla famiglia. Infine, per lo più dopo i trentadue-trentatré anni d'età, coloro che sono rimasti nel campo sperano di ottenere un posto nel corpo docente di un'università o fra gli scienziati anziani nei laboratori, e di poter avere nuove opportunità e responsabilità.

Un dottorando che ha optato per la fisica teorica, invece, lavora di solito sotto la guida di un membro del corpo docente, affrontando dapprima qualche problema relativamente semplice per mettere alla prova le sue capacità, e poi concentrandosi su un singolo problema dettagliato nel settore di frontiera in cui lavorerà a tempo pieno per un paio di anni circa. Di norma lo studente di teoria consegue un PhD in quattro o cinque anni, seguito se possibile da un posto di ricercatore. I teorici giovani, dopo il dottorato, di solito non lavorano « per » qualcuno. Essi hanno una certa indipendenza, anche se spesso collaborano con altri teorici. È durante il periodo di ricerca dopo il dottorato (che nella maggior parte dei casi dura da due a sei anni) che il giovane teorico dovrebbe maturare diventando un fisico delle particelle in grado di scegliere indipendentemente direzioni di ricerca.

In un mondo migliore, qualsiasi persona di talento sufficientemente motivata dovrebbe poter studiare qualsiasi campo la interessi, ottenendo poi un lavoro di insegnamento e ricerca in quell'area. Due secoli fa ciò sarebbe stato impossibile; oggi è possibile ad alcuni ma non a tutti. Per un teorico delle particelle, il conseguimento di un lavoro dopo il dottorato dipende in pratica in gran parte dal suo relatore per la tesi di dottorato. Coloro che assumono ricercatori in altre università e laboratori conoscono il relatore e le sue ricerche, mentre non sanno niente del neodottore. Io sono motivato a procurare buoni posti ai miei allievi, ma sono almeno altrettanto motivato a mantenere per molti anni buoni rapporti con i miei colleghi di altre università. Diversamente che in molte altre aree accademiche e non accademiche, la maggior parte dei ricercatori di fisica delle particelle di tutte le parti del mondo si conoscono, sia perché il campo è piccolo sia perché le comunicazioni e i viaggi sono una parte importante del processo di ricerca.

Quando viene il momento per presentare la domanda per una seconda borsa di studio come ricercatore, o per un posto nel corpo docente, il giovane teorico ha avuto l'opportunità di dimostrare le sue capacità; le decisioni se assumerlo o no possono fondarsi più direttamente sulle ricerche che ha fatto. Se ci sono abbastanza posti disponibili, le decisioni che vengono prese sono accettabilmente obiettive. Negli anni '90, a causa dei continui tagli nei finanziamenti in fisica delle particelle (anche se i tagli furono percentualmente modesti, il loro effetto cumulativo su vari anni venne ad avere conseguenze sempre più gravi), il numero di opportunità per ricercatori dopo il dottorato è inferiore a quello che era stato in precedenza per vari anni. Anche il numero dei posti di docente è molto piccolo, di poche unità all'anno in tutti gli Stati Uniti. Teorici probabilmente altrettanto bravi di altri che già insegnano nelle principali università sono costretti a lasciare la ricerca. In queste condizioni i neodottori hanno bisogno della protezione di docenti per poter competere per i pochi posti disponibili.

Negli Stati Uniti ci sono oggi, secondo una battuta scher-

zosa, circa venticinque fra università e laboratori che formano i *Top Ten*. Un laureato o un dottore di ricerca in fisica può lavorare in una qualsiasi di tali istituzioni e avere accesso alle risorse e ai colleghi necessari per competere all'avanguardia della fisica delle particelle. È possibile competere anche in altri dieci-quindici luoghi, ma con maggiore difficoltà. Nella teoria delle particelle ci sono un po' più di un centinaio di posti per ricercatori dopo il dottorato, dei quali forse metà si rendono disponibili ogni anno. In questo campo c'è qualche scambio con l'Europa, e un po' anche col Giappone. In anni recenti fisici dell'ex Unione Sovietica e dell'Europa Orientale hanno concorso in un numero senza precedenti per posti negli Stati Uniti. Ogni anno circa duecento teorici ben qualificati concorrono per la cinquantina di posti di ricercatori disponibili, e quasi altrettanti per il piccolo numero di posti di insegnamento. Poiché molti candidati hanno buoni titoli, nell'assegnazione dei posti acquistano un peso significativo altri fattori (fra cui la protezione di docenti, l'integrazione nella ricerca, l'attualità o no delle ricerche del candidato).

I numeri citati sollevano alcuni problemi di difficile soluzione. Si fa presto a dire che non si dovrebbero preparare studenti in campi in cui c'è scarsità di posti di lavoro. Quando però ci si trova di fronte a uno studente che desidera più di qualsiasi altra cosa al mondo capire meglio il funzionamento dell'universo, e partecipare alla ricerca di una maggiore conoscenza, sembra saggio spiegargli il rischio ma lasciare a lui la decisione ultima. Alcuni si lasciano dissuadere, ma la maggior parte no. I professori ottengono per lo più risultati molto migliori quando hanno studenti ad assisterli nelle loro ricerche, cosicché non è chiaro se i professori adottino sempre in proposito un atteggiamento obiettivo con i loro allievi.

Un altro problema difficile negli Stati Uniti è quello delle cattedre di ruolo. I giovani docenti vengono giudicati, di solito nel loro sesto anno di insegnamento, per giudicare se meritino o no di diventare professori di ruolo. Si valutano soprattutto la produttività come ricercatori e l'attitudine ad

assumere compiti direttivi, ma nei criteri si include anche la capacità nell'insegnamento. Questo periodo può essere molto difficile per i giovani, che spesso devono formarsi una famiglia, comprarsi la prima casa, imparare a insegnare e infine avere un'opportunità di realizzare gli obiettivi delle loro ricerche. Più di due terzi dei giovani docenti otterranno infine una cattedra di ruolo in qualche università. Una volta diventati professori universitari, di solito spendono metà del loro tempo nell'insegnamento – di più durante l'anno accademico, di meno d'estate – e metà nella ricerca. Essi insegnano sia agli studenti universitari sia ai laureati che seguono i corsi di dottorato.

La comunità internazionale

Nell'ultimo mezzo secolo si è sviluppata una forma di cultura molto efficace ai fini della ricerca in fisica delle particelle, una cultura che insiste sul valore della comunicazione e sulla natura internazionale della scienza.

La fisica delle particelle è coltivata in molti paesi, particolarmente in Europa, negli Stati Uniti e in Giappone. Contando solo i fisici delle particelle molto attivi, nel mondo ci sono varie centinaia di teorici, e forse un numero doppio di sperimentatori. Se si contano anche i fisici meno attivi, il loro numero diventa molto superiore. Dopo un po' di tempo la maggior parte dei ricercatori attivi si conoscono personalmente. Tutte le università e i laboratori importanti hanno (di solito) un seminario settimanale di ricerca sperimentale e uno di teoria, tenuti in genere o da un fisico di passaggio o da uno che è stato fatto venire appositamente. Il professore in visita descrive di solito le sue ricerche, che spesso non sono ancora terminate. Alla presentazione seguono sovente discussioni (non di rado piuttosto accese). Il professore in visita, a sua volta, viene informato di ciò che fanno i teorici o i ricercatori del posto. Negli ultimi anni la posta elettronica ha fornito un nuovo mezzo per facilitare e stimolare la comuni-

cazione. In generale si forma un utile spirito di corpo, dovuto al fatto di condividere la stessa storia, gli stessi conoscenti e gli stessi obiettivi (nonostante una competizione a volte sfrenata).

I finanziamenti

Poiché difficilmente le ricerche d'avanguardia hanno applicazioni a breve scadenza, la *big science* può essere finanziata in pratica solo dai governi. Tradizionalmente gli Stati Uniti hanno finanziato la ricerca in fisica delle particelle e in scienze affini per poter essere all'avanguardia in tali campi e assicurarsi una forza economica e militare, anche se i risultati della fisica delle particelle non hanno applicazioni militari dirette.

Più specificamente, dopo la seconda guerra mondiale economisti e leader politici hanno via via capito sempre meglio che ci sono varie ragioni, oltre al prestigio nazionale, per cui un paese dovrebbe finanziare la ricerca scientifica di base, anche quella che difficilmente può avere applicazioni immediate. Non solo le nuove conoscenze arricchiscono la nostra eredità culturale – e quando gli storici futuri considereranno i progressi del XX secolo nella fisica delle particelle essi appariranno come uno dei grandi contributi alla storia intellettuale di ogni tempo – ma questo entusiasmo intellettuale, se continuerà, attrarrà nuovi giovani verso carriere scientifiche e tecniche; e quando molti giovani vanno a lavorare nell'industria con una conoscenza aggiornata di nuove tecniche e nuove idee (il metodo migliore che sia mai stato inventato per il « trasferimento di tecnologie »), si creano le condizioni migliori per il progresso scientifico.

Una scienza di alto livello può esistere solo in paesi economicamente forti, in quanto la ricerca esige un sostegno economico adeguato; la scienza restituisce però il beneficio ricevuto, stimolando a sua volta con le sue conquiste l'economia di un paese e rendendolo più ricco. I risultati delle ricerche conducono spesso ad applicazioni che migliorano la

qualità della vita e le scelte economiche. Benché la stimolazione dell'economia non sia l'obiettivo immediato dei progetti scientifici, le nuove tecniche e le nuove macchine richieste dalla ricerca d'avanguardia hanno spesso un impatto o una « ricaduta » importante sull'alta tecnologia e sull'economia. Spesso le apparecchiature richieste per grandi progetti di ricerca forniscono un mercato garantito a breve termine che può trasformare nuove aziende in industrie vitali in grado di stimolare a loro volta un'economia sana. Negli Stati Uniti questo ruolo fu svolto dagli anni '50 sino alla fine degli anni '80 dagli approvvigionamenti di alta tecnologia per le forze armate.

La principale responsabilità per il finanziamento dei grandi laboratori di fisica delle particelle è stata assegnata negli Stati Uniti (Brookhaven, SLAC e Fermilab, vedi il capitolo 5) a quello che è oggi il Dipartimento dell'Energia (DE). Il DE finanzia anche la maggior parte della ricerca in fisica delle particelle nelle università. La National Science Foundation (NSF) finanzia il collisore per elettroni della Cornell University e una parte significativa di tutta la ricerca che si svolge nelle università.

L'intero sistema di finanziamenti si fonda sull'esame delle proposte da parte di colleghi. Ogni anno i laboratori stessi, i gruppi di fisici nelle università e singoli individui sottopongono al DE e alla NSF proposte di ricerche per le quali chiedono finanziamenti. Tutte le proposte vengono esaminate da esperti, e infine gli scienziati del DE e della NSF (che hanno tutti un PhD in fisica) definiscono un bilancio preventivo fondato sui pareri che hanno ricevuto dai loro consulenti e sulla somma totale che viene permesso loro di distribuire.

I teorici hanno bisogno di finanziamenti per sostenere le ricerche di dottorandi e di ricercatori, per le spese di elaborazione al computer, per recarsi a congressi, per le loro segretarie, per pagare i professori ospiti e per le comunicazioni (tutte queste cose prese insieme formano in pratica i loro laboratori). Nel caso degli sperimentatori si aggiunge un altro aspetto. Per eseguire un esperimento usando fasci di par-

ticelle accelerate, gli sperimentatori devono preparare anche una proposta per il laboratorio, fornendo giustificazioni scientifiche e tecniche. Ogni laboratorio ha un proprio comitato scientifico per la definizione del programma, composto per circa due terzi da sperimentatori di altre istituzioni, comprendenti di solito qualche fisico europeo e giapponese, e per un terzo da teorici. Ogni proposta viene considerata sulla base di criteri come la sua importanza scientifica e la sua realizzabilità tecnica. Si possono includere anche criteri concernenti il personale che si richiede e il livello di finanziamento, ma questi sono criteri secondari. Il comitato per il programma ha sempre una funzione consultiva per il direttore del laboratorio; questi di norma approva un esperimento appoggiato dal comitato, ma a volte può non approvarlo, e può anche preferirgliene uno respinto dal comitato, se pensa che presenti motivi validi di interesse.

Una volta approvato un esperimento, i suoi proponenti sono autorizzati a sviluppare il progetto dettagliato di un rivelatore e a passare alla sua costruzione, supponendo che anche le proposte di finanziamento siano state approvate. Prima che l'esperimento sia programmato, il direttore dev'essere convinto che tutto sia pronto, e in questo caso può essere di nuovo consultato il comitato per il programma.

Da quando le dimensioni dei rivelatori sono cresciute fino alle proporzioni gigantesche richieste per i collisori attuali e futuri, questa procedura ha subìto qualche modifica. I rivelatori sono così grandi, tecnicamente difficili da realizzare e così costosi che per costruirli devono unirsi un gran numero di sperimentatori (alcune centinaia per i rivelatori attuali, di più per quelli futuri). In ogni collisore si possono usare solo uno o pochi di tali grandi rivelatori. All'inizio possono esserne proposti molti, ma dopo il loro esame alcuni vengono bocciati. Di solito all'approvazione il laboratorio si impegna a fornire il finanziamento attingendo ai propri fondi. I comitati per i programmi possono poi ancora intervenire per esaminare potenziamenti, modificazioni e futuri tempi di funzionamento.

Il sistema di finanziamento e di valutazione dei progetti da parte di colleghi proprio degli Stati Uniti ha molti punti di forza ed è piuttosto efficiente nel valorizzare al massimo la buona fisica, ma ha due principali punti deboli. Innanzitutto, i comitati per il finanziamento rimangono in carica solo un anno, mentre la scala di tempo reale per poter fare qualcosa di utile nella fisica delle particelle è da tre a quattro anni o più. In secondo luogo, la scala complessiva del bilancio preventivo non viene fissata sulla base di criteri scientifici o in vista della possibilità di ricavare il massimo vantaggio dalle opportunità che si presentano.

La fisica delle particelle si sviluppò in modo diverso in Europa. Dopo la seconda guerra mondiale i paesi europei riuscirono a concordare un piano per un laboratorio europeo nella ricerca sulle particelle nucleari. Esso fu chiamato CERN dalla sua prima denominazione in francese, Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire. (Il CERN ha due lingue ufficiali: il francese e l'inglese; in pratica tutti i seminari di fisica sono in inglese perché questo è l'unica lingua comune ai fisici di molti paesi.) Il CERN ha un finanziamento stabile a un livello fisso, che viene però corretto periodicamente per tener conto dell'inflazione. I fisici del laboratorio, sapendo in anticipo quanto riceveranno, possono progettare con efficienza la costruzione futura. Ogni paese membro del CERN contribuisce in proporzione al suo prodotto interno lordo (con un limite superiore). Per alcuni anni i paesi membri sono stati tredici; altri se ne sono aggiunti recentemente cosicché il loro numero totale è salito a diciannove. Il bilancio preventivo totale del CERN è oggi press'a poco equivalente alla previsione totale di spesa degli Stati Uniti per la fisica delle particelle (con qualche incertezza dovuta ai tassi di scambio).

Ogni paese europeo finanzia inoltre la fisica delle particelle nei propri istituti e università, e alcuni paesi hanno laboratori sperimentali. La Germania ha un grande laboratorio, Francia e Italia hanno laboratori più piccoli. L'Inghilterra ha avuto negli anni '70 un proprio laboratorio ma ne ha inter-

rotto l'uso per la fisica delle particelle, tranne che per tenervi corsi a sperimentatori inglesi che lavorano altrove. Combinando il bilancio del CERN con il finanziamento interno nei vari paesi europei, il sostegno alla fisica delle particelle in Europa è quasi doppio di quello degli Stati Uniti, anche se la popolazione e il PNL in Europa sono superiori solo di un 25 per cento circa. Se negli Stati Uniti fosse oggi operante l'SSC, il finanziamento statunitense totale alla fisica delle particelle sarebbe quasi altrettanto grande di quello europeo.

Arrivederci, SSC

Alla fine degli anni '70 la teoria standard era ormai abbastanza ben stabilita. Così, nel 1982, i fisici delle particelle cominciarono una serie di studi internazionali per discutere di quali attrezzature ci fosse bisogno per verificare la teoria e le idee su cui si fondava. Quasi ogni anno varie centinaia di fisici si incontrarono per tre settimane circa per discutere e valutare possibili direzioni. Ben presto divenne chiaro che si poteva progettare una macchina in grado di garantire un progresso nelle nostre conoscenze, e che tale macchina era tecnicamente realizzabile. Macchine meno potenti avrebbero sì potuto condurre a risultati importanti, ma la cosa non era affatto certa. Quella macchina ideale fu chiamata Superconducting SuperCollider (SSC, Supercollisore a magneti superconduttori). La comunità della fisica delle particelle si rese conto che, chiedendo l'SSC, avrebbe chiesto molto, ma decise che valeva la pena di chiederlo e attese la risposta del governo.

Nel 1985 la comunità dei fisici sottopose al Dipartimento per l'Energia una proposta iniziale per l'SSC. Dopo averla esaminata, il DE la trasmise all'amministrazione Reagan, la quale infine autorizzò a procedere e chiese un progetto e una stima dei costi; a tale scopo furono stanziati dei fondi. Secondo il progetto e la stima presentati – l'uno e l'altra necessariamente provvisori perché non erano disponibili fondi per la realizzazione di prototipi e perché non era stato scelto alcun sito specifico – risultò che l'SSC sarebbe costato un po' più di tre volte di quanto era costato il Fermilab, calcolato sulla stessa base e in dollari, tenendo conto del deprezzamento del dollaro in conseguenza dell'inflazione. La previsione di spesa fu di circa 3,3 miliardi di dollari per il solo acceleratore, e saliva a circa 4,5 miliardi di dollari se si includeva il costo dei rivelatori, dei computer, degli impianti accessori, delle operazioni di installazione ecc., in dollari del 1986. Il progetto fu approvato e si procedette alla scelta del sito.

La fase successiva fu lo sviluppo di un progetto dettagliato in riferimento al sito prescelto. In seguito a uno studio accurato, si introdusse una modifica nel progetto dei magneti che fece lievitare il costo della macchina stessa del 15 per cento. La stima finale dei costi dell'acceleratore più tutti i costi associati fu completata nel 1990. Essa fu riferita in dollari di allora (le spese di ogni anno furono espresse nei dollari inflazionati di quell'anno) anziché in dollari del 1986, e si arrivò al totale di 8,25 miliardi di dollari, che era l'equivalente della stima precedente, più il costo della modifica del progetto, tenendo conto dell'inflazione. Non si verificò alcun altro cambiamento di progetto né alcun aumento di costi, anche se, dopo che le amministrazioni Bush e Clinton ebbero fatto diluire il periodo di costruzione, il costo in dollari di allora crebbe con l'inflazione.

Nel corso di numerose discussioni al Congresso, gli avversari del progetto e vari giornalisti affermarono ripetutamente che si era andati oltre i costi previsti. Ma nell'estate del 1993 in una testimonianza giurata sull'SSC dinanzi al Senato, poco prima del voto finale che condusse alla cancellazione del progetto, il ministro per l'Energia disse che l'SSC era « in regola col bilancio e con i tempi ». E nel settembre 1993, in una dichiarazione del comitato esecutivo dell'American Physical Society, che rappresentava tutti i campi della fisica, si disse che « il Supercollisore è un progetto di grande merito scientifico che ha soddisfatto tutte le richieste tecniche ».

Se avessero potuto disporre dell'SSC, i fisici delle particelle si sarebbero trovati in una situazione entusiasmante, e a partire dal 1999 avrebbero cominciato a raccogliere le prove che erano state prospettate nel corso degli sviluppi degli anni '80. Purtroppo il Congresso ha messo fine al progetto dell'SSC, rimangiandosi le promesse fatte con l'approvazione del 1989. Non che senza l'SSC la fisica delle particelle negli Stati Uniti sia morta o si trovi in una condizione critica, ma senza dubbio molti fisici la cui carriera è stata sconvolta dall'annullamento del progetto impiegheranno anni per riprendersi. È vero invece che la fisica delle particelle si trova oggi nella stessa condizione della maggior parte delle discipline scientifiche negli Stati Uniti, dovendo operare a un livello inferiore a quello di una sana efficienza e non potendo approfittare della maggior parte delle sue stimolanti possibilità. Noi ci imbatteremo in molte di tali opportunità nei capitoli seguenti.

4
La teoria standard

I quark e i leptoni, le loro interazioni mediate da fotoni, gluoni e altre particelle, e le regole per calcolare i risultati delle interazioni, compongono congiuntamente la teoria standard della fisica delle particelle

FINORA ho presentato il quadro sorprendentemente semplice, ricostruito dai fisici, delle particelle da cui ha origine l'intera natura, seguito da un breve sguardo agli sviluppi storici che hanno condotto alla teoria standard. In questo capitolo adotteremo un punto di vista diverso e compendieremo la teoria standard senza fare alcun riferimento alla sua storia, o allo status speciale che alcune particelle e forze hanno per noi e per il nostro mondo quotidiano. Da un punto di vista fondamentale, il fatto che nel nostro corpo ci sia una grandissima quantità di elettroni e nessun leptone tau è irrilevante: le due particelle hanno nella teoria uno status uguale. Similmente, la forza debole non svolge alcun ruolo nel corpo umano, ma per la fisica fondamentale è altrettanto importante della forza elettromagnetica. Quark e leptoni esistono dall'inizio dell'universo, quando interagivano attraverso tutte le forze. L'uomo è apparso solo in epoca relativamente recente, vari miliardi di anni dopo l'apparizione delle particelle.

Per i fisici la parola « teoria » implica una base nella sperimentazione. Una teoria include nella sua formulazione molti esperimenti cruciali, e quindi la teoria standard non è solo una teoria bensì la combinazione di espressioni matematiche e della loro fondazione sperimentale. Essa include tutte le leggi naturali che conosciamo (eccezion fatta per la gravità). In fisica, una volta completati i decenni di sviluppo di una nuova fase di comprensione della natura, è cosa abituale e appropriata formulare la teoria in un modo matematico con-

ciso, ignorando le vie spesso tortuose che hanno condotto al risultato finale. La teoria standard, il risultato unico di molte idee e di molti esperimenti, alla quale si è giunti dopo vari decenni, contiene vari elementi in precedenza non previsti.

La teoria viene descritta con riferimento alle particelle materiali (quark e leptoni) su cui agiscono le forze, e alle particelle che trasmettono le forze (queste ultime particelle sono di due tipi: bosoni di gauge e bosoni di Higgs). I bosoni di gauge comprendono il fotone, che trasmette l'interazione elettromagnetica, e particelle simili per le altre interazioni (gluoni, bosoni *W* e bosoni *Z*); tutte queste particelle saranno descritte fra poco. In fisica delle particelle le parole «forza» e «interazione» significano essenzialmente la stessa cosa. Secondo la teoria standard, della massa di ogni particella è responsabile l'interazione dei bosoni di Higgs con altre particelle. Noi non sappiamo ancora se i bosoni di Higgs esistano effettivamente, ma sappiamo che, se non esistono, il loro ruolo dev'essere svolto da qualche altro fenomeno (non ancora scoperto). Nella parte restante di questo capitolo ci occuperemo di tutte le particelle e le interazioni introdotte in questo paragrafo eccezion fatta per i bosoni di Higgs, di cui tratteremo nel capitolo 8. La tabella 4.1 è un compendio della teoria standard da un certo punto di vista.

Le particelle materiali

Le particelle materiali (quark e leptoni) si presentano in determinate configurazioni, che la figura 4.1 ci aiuterà a visualizzare. Nei leptoni ci sono sei sapori (sì, la scelta del nome sapori si fonda sull'analogia col gelato): l'elettrone (e), il neutrino elettronico (ν_e), il muone (μ), il neutrino muonico (ν_μ), il tauone (τ) e il neutrino tauonico (ν_τ). I sei sapori possono essere distinti in tre famiglie, che sono quasi copie l'una dell'altra: la famiglia dell'elettrone, la famiglia del muone e la famiglia del tauone. Due diversi caratteri ci dicono che la struttura in famiglie effettivamente esiste. In-

Tabella 4.1

	Nome	*Massa**	*Sente la forza***	*Media la forza***	*Carica elettrica*	*Carica di calore*	*Spin*		
e, μ, τ	leptoni carichi (elettrone, muone, tau)	1/1836; 1/9; 1,9	EM D	—	–1	no	1/2	leptoni	fermioni
ν_e, ν_μ, ν_τ	neutrini	$< 10^{-8}$; < 1/3500; < 1/30	D	—	0	no	1/2	leptoni	fermioni
u, c, t	quark up, charm (incanto), top	1/235; 1,6; 165	EM D, F	—	+2/3	sì	1/2	quark	fermioni
d, s, b	quark down (giù), strani, bassi	1/135; 1/6; 5,2	EM D, F	—	–1/3	sì	1/2	quark	fermioni
γ	fotone	0	nessuna	EM (lega elettroni e nuclei negli atomi)	0	no	1	bosoni di gauge	bosoni
$\omega^{\pm}$	bosoni deboli	85	D, EM	D	±1	no	1	bosoni di gauge	bosoni
z	bosone debole	97	D	D	0	no	1	bosoni di gauge	bosoni
g	gluoni	0	F	F (lega quark negli androni)†	0	sì	1	bosoni di gauge	bosoni
h	bosoni di Higgs	ignota, 65-160△	D	genera massa	0	no	0		bosoni

* Rapporto alla massa del protone; < significa «meno di»; le masse dei quark sono esatte solo al 20 per cento.

** EM = elettromagnetica, D = debole, F = forte. Tutte le particelle sentono la forza gravitazionale, la quale però viene trascurata ai fini della teoria standard, in quanto essa è molto più debole delle altre forze. I fotoni non sentono direttamente le forze, ma interagiscono con tutte le particelle elettricamente cariche.

† Protone, neutrone, lambda, pioni, kaoni e altre particelle sono chiamate collettivamente adroni; protone, neutrone e altre particelle formate da tre quark sono chiamate barioni, mentre i pioni, i kaoni e altre particelle formate da quark e antiquark sono chiamate mesoni.

△ Se esiste un bosone di Higgs fondamentale, ci si attende che si trovi in quest'intervallo.

Famiglie

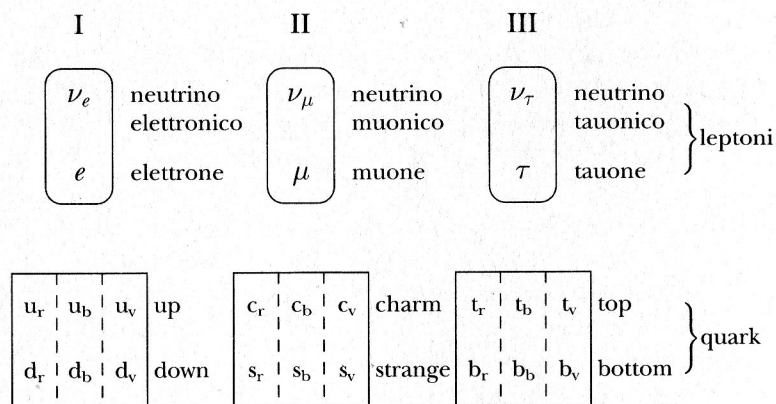



Figura 4.1. Le particelle materiali, leptoni e quark. Esse hanno tutte quante uno spin di grandezza 1/2 (in unità che ignoreremo). I leptoni si presentano in sei sapori (e, ν_e, μ, ν_μ, τ, ν_τ), che sono raggruppati in tre famiglie come si vede nella figura. All'interno di ogni famiglia possono essere trasmutati l'uno nell'altro, ma non possono passare da una famiglia all'altra (per esempio, può accadere $e \leftrightarrow \nu_e$, ma non $e \leftrightarrow \nu_\mu$ o $\nu_e \leftrightarrow \mu$). I due membri di ogni famiglia sono chiamati un doppietto elettrodebole; hanno carica elettrica diversa di un'unità, e una carica debole diversa. Similmente, ci sono sei sapori di quark (*d, u, s, c, b, t*), raggruppati in tre famiglie. Di nuovo, all'interno di ogni famiglia possono verificarsi conversioni, e i membri hanno diversa carica elettrica e debole. Le conversioni fra quark possono aver luogo anche fra una famiglia e l'altra, ma con probabilità molto ridotta. Ogni tipo di quark si presenta in tre diverse cariche di colore, rossa (r), verde (v) o blu (b). I diversi stati di carica di colore di ogni tipo di quark sono altrimenti indistinguibili fra loro, dato che hanno la stessa massa e la stessa carica elettrica e debole, cosicché le forze elettromagnetica, debole e gravitazionale non possono separarli. I nomi *up* (su) e *down* (giù) e *top* (alto) e *bottom* (basso) sono stati scelti semplicemente per la loro posizione nei doppietti, come si vede nella figura

nanzitutto l'elettrone, il muone e il tauone sembrano differire l'uno dall'altro *solo* per avere massa diversa. Possiamo esprimere tutte le masse in rapporto alla massa del protone (anziché definire un'unità distinta). Otteniamo in tal modo 1/1836 per un elettrone, 1/9 per un muone e 1,9 per un tauone. Le formule usate nelle predizioni di ogni proprietà e

interazione nota di un elettrone dipendono dal valore usato per la massa dell'elettrone. Sostituendo alla massa dell'elettrone la massa del muone, si ottengono le predizioni corrispondenti per il muone; e lo stesso vale per il tauone. Tutte le predizioni fatte per i tre leptoni sono state confermate sperimentalmente, entro i margini consentiti dalla precisione degli esperimenti attuali. La natura sembra quindi aver replicato due volte il neutrone (o forse, più obiettivamente, a essere replicato due volte è stato il tauone o il muone).

A ognuna delle particelle e, μ e τ è associata una particella detta neutrino, che non trasporta alcuna carica elettrica; μ e τ hanno la stessa carica elettrica dell'elettrone. La teoria standard descrive correttamente anche le interazioni dei neutrini. Un fascio di neutrini elettronici, colpendo un bersaglio, causerà con una certa probabilità la produzione di elettroni in moto in una certa direzione con una certa energia. La stessa frase vale esattamente sostituendo ai neutrini elettronici i neutrini muonici e agli elettroni i muoni. Le equazioni che descrivono la produzione di elettroni descrivono anche la produzione di muoni, se si usa in luogo della massa del muone quella dell'elettrone. La massa dei neutrini non è ancora stata misurata, ma noi sappiamo che essi hanno massa molto piccola o nulla; per esempio, la massa dei neutrini sarebbe già stata rivelata se non fosse almeno 50.000 volte più leggera di quella dell'elettrone.* Torneremo in seguito a considerare le masse di queste particelle, in quanto ci si attende che ci insegnino come estendere la teoria standard.

Il secondo carattere che ci dice che c'è una struttura per famiglie è il fatto che possano verificarsi transizioni capaci di trasformare un elettrone in un neutrino elettronico o un muone in un neutrino muonico o un tauone in un neutrino

* Nel corso del 1995 il fisico Hywel White, del laboratorio di Los Alamos, ha annunciato che il suo gruppo sarebbe riuscito a misurare il neutrino: la massa di questa particella sarebbe compresa fra 0,5 e 5 eV, da 100.000 a un milione di volte inferiore a quella di un elettrone, la quale è a sua volta quasi 2000 volte inferiore a quella di un protone. (*N.d.T.*)

tauonico (e viceversa), mentre un elettrone non si trasforma mai in un neutrino muonico o in un neutrino tauonico, o un muone in un neutrino elettronico o in un neutrino tauonico, e via dicendo. Fra le famiglie di leptoni esiste dunque una chiara linea di demarcazione. Gli elettroni compaiono negli atomi che compongono il nostro corpo, diversamente dal muone e dal tauone, che hanno una vita molto breve e vengono prodotti solo negli acceleratori e nei raggi cosmici.

Lo spettro di variazione dei quark è molto simile a quello dei leptoni. Ci sono sei sapori di quark: *up* o su (u), *down* o giù (d), *strange* o strano (s), *charm* o incanto (c), *bottom* o basso (b) e *top* o alto (t), in ordine di massa crescente. I quark *up*, *charm* e *top* hanno una carica elettrica di –2/3, ponendo uguale a 1 la carica di un elettrone, mentre i quark *down*, *strange* e *bottom* hanno una carica di +1/3. Anche i quark si presentano in tre famiglie con le stesse proprietà, eccezion fatta per la massa (vedi la tabella 4.1). Posta uguale a 1 la massa del protone, il quark *up* ha massa pari a circa 1/235, il quark *down* 1/135, il quark *strange* 1/6, il quark *charm* 1,6, il *bottom* 5,2 e il *top* 170; si deve peraltro aggiungere che le masse dei quark sono state misurate finora solo con una precisione attorno al 20 per cento.

Fra quark e leptoni ci sono due differenze principali. Innanzitutto, i quark possono compiere transizioni all'interno di famiglie come i leptoni – per esempio da u a d o viceversa ($u \leftrightarrow d$) – ma possono compiere anche transizioni molto più deboli, convertendosi in altri quark, di diversa carica elettrica, $u \leftrightarrow s$, o $u \leftrightarrow b$ (ma non $u \leftrightarrow c$ o $u \leftrightarrow t$) ecc. In secondo luogo, i quark possono trasportare un nuovo tipo di carica che non possono portare i leptoni, la carica di colore (introdotta nel capitolo 1). Diversamente dalla carica elettrica, la carica di colore non si presenta nel mondo quotidiano. Tutte le sue manifestazioni sono indirette. È chiamata carica « di colore » perché le regole per combinare i quark in protoni e in altri adroni ricordano le regole per ottenere luce bianca dai colori primari, ma in realtà questo tipo di carica non ha alcuna vera connessione con i colori reali.

La teoria standard ci dice che nessuna particella composta di quark e gluoni, ossia nessun adrone (gli adroni sono le particelle composte comprendenti protoni, neutroni, pioni ecc.) può trasportare alcuna carica di colore netta. Ciò significa che ogni processo implicante quark deve cominciare e finire con adroni, anche se noi preferiremmo osservare direttamente i quark. Immaginiamo di assegnare ai quark i colori primari: rosso, verde e blu. Nella costruzione di adroni si possono usare anche antiquark; essi avranno i colori complementari. Ci sono dunque due e solo due modi di formare oggetti « bianchi », ossia oggetti privi di alcun colore « netto », che potrebbero essere adroni: o combinare tutt'e tre i diversi colori primari, o combinare ogni colore primario col suo colore complementare. Nel primo caso si ha il sottoinsieme di adroni chiamati barioni, comprendente il protone, il neutrone e altri, mentre il secondo fornisce un secondo insieme di adroni, i mesoni (pioni, kaoni e altri). Uno fra i risultati principali conseguiti dalla teoria standard è quello di soddisfare in un modo fondamentale il bisogno di due e due soli tipi di adroni (barioni e mesoni), dal momento che questi sono i due tipi che realmente esistono. Ed è chiara l'attrattiva di chiamare carica « di colore » il tipo di carica nuovo e non familiare trasportato dai quark.

La fisica delle particelle negli anni '50 e '60 si concentrava principalmente sugli adroni, giacché i quark erano sconosciuti o erano stati appena introdotti. Dopo l'inizio degli anni '70 l'attenzione si spostò su quark e leptoni. Ma i quark si presentano sempre all'interno di adroni, cosicché l'uso e lo studio ultimi di questi è essenziale per la conoscenza dei quark; quando sono in gioco quark (o gluoni), gli esperimenti cominciano e finiscono con gli adroni. La nostra descrizione di esperimenti comprenderà perciò spesso gli adroni come intermediari.

Un elettrone, un protone o un neutrone può venire isolato da altre particelle ed essere studiato separatamente, mentre ciò non è possibile per un quark, che dev'essere sempre legato all'interno in un adrone. Questo fatto ha condotto

alcuni a chiedersi se i quark esistano effettivamente nello stesso senso in cui esistono gli elettroni. Un'analisi accurata mostra che le differenze fra quark e altre particelle sotto questo aspetto sono solo una questione di grado. Gli elettroni sono legati dall'attrazione gravitazionale alla Terra, e dalla forza elettromagnetica ad altre particelle cariche, ma in modo non molto stretto, dato che le forze gravitazionali ed elettriche non sono molto intense. Perché un elettrone (o qualcos'altro) possa essere visto o percepito, dei fotoni devono rimbalzare su di esso ed essere captati da un rivelatore (l'occhio, una pellicola fotografica o un dispositivo elettronico). I quark sono legati da queste stesse forze, ma sono soggetti anche alla cosiddetta interazione forte, che è di gran lunga più intensa. Perché un quark possa essere visto, è necessario che dei fotoni (o qualche altra particella) rimbalzino su di esso. In questo caso i proiettili devono avere un'energia abbastanza grande per poter essere percepiti da un rivelatore appropriato, anche se questo non può essere un occhio né una macchina fotografica.

C'è una prova indiretta ma buona del fatto che non esistono altre famiglie simili alle tre che conosciamo. La prova ci dice che non potrebbero esistere neppure supponendo che i loro quark e i loro leptoni dotati di carica elettrica fossero più pesanti di quelli che potrebbero essere prodotti direttamente dai collisori di oggi. Se ci fossero nuove famiglie, esse inciderebbero sui calcoli in due modi. Innanzitutto, quand'anche i loro quark fossero pesanti, i loro neutrini potrebbero essere leggeri come gli altri neutrini. Allora il bosone *Z* decadrebbe a volte nel nuovo neutrino più antineutrino, e tale decadimento sarebbe stato scoperto dal collisore LEP del CERN. In secondo luogo, misurazioni recenti eseguite nel collisore SLC allo SLAC fornirebbero un valore per una certa quantità se esistesse una nuova famiglia di particelle pesanti, e un valore leggermente diverso se essa non esistesse. Le prime relazioni su esperimenti forniscono la prova che non esiste nessun'altra famiglia oltre alle tre note.

Le forze e le particelle che le trasmettono: i bosoni

La teoria standard ammette le quattro forze. Non dico «richiede» perché per poter richiedere queste forze o per proibirne altre avrebbe bisogno di qualche altro dato; spero che un giorno tali condizioni più forti possano entrare a far parte di una teoria estesa.

La gravità è una sorta di spettatrice, dal momento che la teoria standard riguarda in realtà le forze deboli, elettromagnetica e forte; le interazioni gravitazionali delle particelle sono di gran lunga più deboli persino delle loro interazioni deboli.

Gli effetti della forza elettromagnetica sono quelli a noi più familiari dopo quelli della gravità. Ogni particella dotata di una carica elettrica crea un campo elettromagnetico nello spazio. L'intensità del campo diminuisce (in ragione del quadrato della distanza) al crescere della distanza dalla particella. Qualsiasi altra particella dotata di una carica elettrica, in movimento nel campo creato dalla prima, sentirà l'effetto del campo e cambierà direzione (le cariche dello stesso segno si respingono, le cariche di segno opposto si attraggono). Per modificare la direzione di una particella in movimento, il campo deve respingerla o attrarla, trasferirne una parte dell'energia o della quantità di moto. Poiché la teoria standard è una teoria quantistica, l'energia di campo e la quantità di moto sono quantizzate: esse si presentano in pacchetti.

Nell'elettromagnetismo, il pacchetto di energia e di quantità di moto si chiama fotone. La luce che vediamo è composta di fotoni, che trasferiscono energia dal mondo esterno agli atomi nei nostri occhi. Quando due particelle dotate di carica elettrica interagiscono attraverso la forza elettromagnetica, diciamo che la loro interazione è mediata oppure trasmessa dallo scambio di un fotone. Come le parole «forza» e «interazione» possono essere interscambiate, così lo stesso vale in questo contesto per i verbi «trasmettere» e «mediare». Il fotone, e qualsiasi altra particella che, essen-

do un quanto di un campo, trasmette una forza, viene chiamata « bosone ». La teoria quantistica dell'elettromagnetismo viene chiamata « elettrodinamica quantistica », abbreviata a volte in QED.

L'interazione elettromagnetica influisce su qualsiasi particella dotata di carica elettrica (i leptoni e, μ, τ, tutti i quark, e i bosoni *W*, che descriveremo più avanti in questo capitolo); quanto ai neutrini e ai fotoni, nonché i gluoni (di cui ci occuperemo più avanti), non sentono la forza elettromagnetica non avendo carica elettrica. Gli atomi sono composti di elettroni (dotati di carica elettrica negativa), legati dalla forza elettromagnetica a nuclei (che hanno una carica elettrica positiva fornita dai protoni). I fotoni sono la colla che unisce gli elettroni ai nuclei. Gli atomi non hanno carica elettrica netta, dato che la carica positiva degli elettroni del nucleo è cancellata esattamente dalla carica negativa degli elettroni legati, cosicché qualcuno potrebbe pensare ingenuamente che non ci sia alcuna forza che leghi gli atomi in molecole e le molecole in fiori, cibi e tavoli. In effetti il campo elettrico creato da un atomo è essenzialmente nullo lontano dall'atomo poiché questo è globalmente neutro, ma in prossimità dell'atomo il campo non è in determinate posizioni del tutto nullo perché alcuni elettroni sono più vicini del nucleo a tali posizioni, mentre altri sono più lontani (vedi figura 4.2). Questo campo elettromagnetico residuo, spesso complicato da calcolare, determina tutte le proprietà di materiali di cui abbiamo esperienza nel nostro mondo quotidiano. A parte la gravità, che ci mantiene legati alla Terra e descrive la caduta dei corpi, è l'elettromagnetismo – non le interazioni forte e debole – a determinare i diversi fenomeni del nostro mondo: fiori, indumenti, medicine, TV, cani e gatti e canarini, Mozart, Picasso, la pioggia, il vento, la visione, il cervello umano, le montagne, l'arcobaleno ecc. Tutti i fenomeni studiati dagli scienziati che si occupano di fisica atomica, di fisica molecolare, di fisica dello stato solido, di scienza dei materiali, di chimica e di molte altre cose dipendono in ultima analisi dall'interazione elettromagnetica.

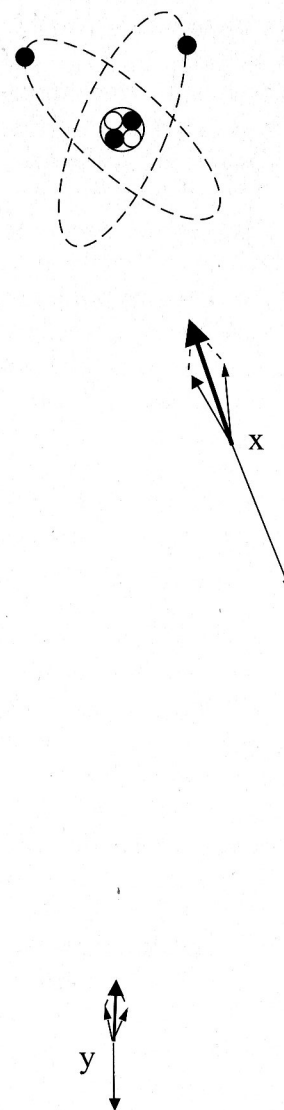



Figura 4.2. Questo disegno mostra in che modo la forza elettromagnetica residua all'esterno degli atomi dà origine alla forza interatomica che conduce alla formazione delle molecole. Qui vediamo un atomo, il cui nucleo contiene due protoni e due neutroni. I due elettroni sono rappresentati da due pallini neri su linee tratteggiate che rappresentano le « orbite » elettroniche. La figura mostra i campi elettrici in un istante dato nel punto x in prossimità dell'atomo; il campo dovuto a ciascun elettrone è rappresentato da una freccia sottile orientata verso di esso, mentre il campo netto dovuto ai due elettroni è rappresentato da una freccia spessa. La lunghezza di ogni freccia è proporzionale al campo corrispondente. Il campo dovuto ai due protoni è rappresentato dalla freccia sottile che punta in direzione opposta ai protoni stessi. Poiché il punto x è vicino sia agli elettroni sia ai protoni, la freccia spessa e quella sottile, pur essendo quasi esattamente opposte, hanno lunghezza notevolmente diversa e non si cancellano del tutto. La piccola differenza esistente fra loro rappresenta il campo elettrico netto dovuto all'atomo in quel punto. Un altro atomo che si trovasse in quel punto sentirebbe il campo e ne sarebbe attratto o respinto. Nel punto y, più lontano, i campi sono minori (diminuendo in ragione del quadrato della distanza) e le frecce sono meno divergenti, cosicché la cancellazione è più completa e un atomo presente in y sentirebbe una forza molto minore. Un quadro simile della forza colore che circonda neutroni e protoni spiega la forza nucleare

La forza debole non ha effetti facilmente riconoscibili nel mondo quotidiano, ma ha tuttavia una grande importanza. Come la forza elettromagnetica è mediata dal fotone, così la forza debole è mediata da quanti del campo debole. La quantità di carica debole che le particelle possono trasportare ha molti più valori possibili della carica elettrica, cosicché per trasmetterla si richiedono tre bosoni, chiamati W^+, Z^0 e W^-. La forza debole, in realtà, è debole non per essere meno intensa della forza elettromagnetica, ma perché il suo raggio d'azione è molto minore, cosicché è improbabile che due particelle si trovino abbastanza vicine da sentire l'una la forza debole dell'altra. Il raggio d'azione della forza è così piccolo perché i bosoni *W* e *Z* che la mediano sono così pesanti che è difficile che due particelle possano scambiarseli. Il campo debole attorno a un leptone o a un quark ha un raggio molto minore del suo campo elettromagnetico.

Tutte le particelle portatrici una carica debole (tutti i quark e i leptoni, e anche i bosoni W^+, Z^0 e W^-) sentono tale forza debole; non la sentono solo i fotoni e i gluoni. L'interazione debole è troppo poco intensa per poter legare particelle all'interno di «atomi». Il suo effetto più vistoso è piuttosto quello di rendere instabili tutti i quark tranne il più leggero (*u*), e tutti i leptoni dotati di carica elettrica tranne il più leggero (*e*). A causa di questa instabilità, i quark e i leptoni più pesanti decadono nel quark *up* e nell'elettrone più neutrini; il muone e il quark strano decadono in un milionesimo di secondo circa, e gli altri quark e leptoni ancora più rapidamente. In un universo senza alcuna interazione debole sarebbero esistiti molti tipi diversi di atomi e nuclei, che avrebbero condotto a molti fenomeni diversi.

L'interazione debole svolge un ruolo essenziale anche nei processi che fanno risplendere il Sole – fornendo così la sorgente di energia indispensabile per la vita sulla Terra – e nella costruzione di elementi pesanti essenziali per il funzionamento del nostro corpo. Il primo passo nella produzione di energia nel Sole è il processo protone-protone, nel

corso del quale due protoni entrano in collisione fra loro producendo un neutrino più un positrone e un deutone (un nucleo di deuterio, formato da un protone e un neutrone). Questo processo è un'interazione debole, mediata da un bosone *W*. Forse il modo migliore per pensare le particelle *W* e *Z* è quello di concepirle come oggetti simili ai fotoni ma molto pesanti, i cui effetti sono cruciali per l'irraggiamento solare, e che causano l'instabilità della maggior parte dei quark e dei leptoni.

Gli effetti di una calamita e l'elettricità statica che percepiamo camminando su un tappeto di lana sono molto diversi fra loro, ma è risultato che sono descritti entrambi da una stessa teoria, le equazioni di Maxwell dell'elettromagnetismo. Qualcosa di simile c'è nella teoria standard. L'elettromagnetismo e la forza debole sembrano molto diversi, ma vengono unificati nella teoria standard, dove sono descritti dalle stesse equazioni. Se li si scandaglia a distanze molto brevi con proiettili a grande energia, le forze debole ed elettromagnetica non appaiono più diverse fra loro. Esse sembrano differenti alle basse energie e alle grandi distanze del nostro mondo, perché i quanti che mediano l'interazione debole, i bosoni W^+, Z^0 e W^-, sono molto pesanti e hanno quindi una difficoltà molto maggiore di quella di un fotone a trasmettersi fra particelle interagenti.

L'unificazione della teoria delle interazioni debole ed elettromagnetica nella teoria della forza elettrodebole non è ancora del tutto completa. Se questa sembra essere da un lato un'insufficienza della teoria, dall'altro fornisce anche un'opportunità. I fisici pensano la situazione in un modo piuttosto astratto, che può essere descritto secondo le linee seguenti. In una visione del mondo più fondamentale (descritta in parte nell'Appendice B), c'è una teoria parziale che descrive alcune interazioni di particelle e che è molto simile, ma non del tutto uguale, all'elettromagnetismo, e un'altra teoria parziale che descrive alcune interazioni di particelle ed è molto simile, ma non del tutto uguale, all'interazione debole. Si può immaginare l'unificazione come una fusione

appropriata di tali teorie parziali. Ogni teoria parziale ha una particella simile al fotone, ma la natura contempla un solo fotone, cosicché si dovette cercare un compromesso. Questo è espresso in termini di una rotazione in uno spazio astratto immaginario, cosicché ognuna delle particelle candidate al ruolo di fotone è ruotata in modo da puntare in una nuova direzione nello spazio immaginario e insieme descrivono il fotone reale del nostro mondo. La rotazione è espressa in termini di un «angolo» immaginato, detto θ_W, che chiamiamo l'angolo dell'unificazione elettrodebole; ci imbatteremo ancora in θ_W in altri capitoli.

Se la teoria fosse veramente unificata, potrebbe predire il valore dell'angolo θ_W, ma così non è; finora questo valore ha dovuto essere misurato in esperimenti. È risultato che θ_W = 28,8°. (Per l'esattezza, poiché ogni misurazione ha un margine d'errore, i fisici dicono che l'angolo è compreso fra 28,65° e 28,95°, con un livello di confidenza del 90 per cento.)

Alcuni, insoddisfatti dell'incapacità della teoria standard di predire θ_W, hanno detto che le interazioni debole ed elettromagnetica non sono affatto unificate: un'affermazione però troppo forte. θ_W entra in molte previsioni, ed è stato a tutt'oggi misurato in una quindicina di esperimenti indipendenti, i quali hanno fornito tutti il valore appena menzionato. Se non ci fosse unificazione, ciò che noi abbiamo chiamato θ_W in un esperimento non avrebbe alcun rapporto con ciò che abbiamo chiamato nello stesso modo in un altro esperimento, cosicché θ_W avrebbe potuto essere benissimo –90° (o qualsiasi altro valore) in un esperimento, e +42 (o qualsiasi altro valore) in un altro esperimento. Il fatto che ricorra sempre lo stesso valore comunque l'angolo venga misurato è una prova molto forte a sostegno dell'unificazione.

L'opportunità derivante dal fatto che il valore di θ_W non sia determinato nella teoria standard è molto eccitante per parecchi fisici delle particelle. Nella ricerca di come estendere la teoria non disponiamo di molti indizi sperimentali. Qui abbiamo però un indizio importante; esso ci offre infatti l'opportunità di trovare princìpi utili in teorie che estendano

la teoria standard in modo tale da prevedere correttamente l'angolo θ_W. Il valore 28,8° non sembra molto semplice o facile da ottenere. Risulta però che in alcune teorie ricorre naturalmente una certa quantità, il quadrato di $\sin(\theta_W)$, che ha il valore di 3/8. Esso dev'essere poi modificato per mezzo di certi effetti della teoria quantistica, dopo di che emerge effettivamente θ_W = 28,8°. Una certa classe di teorie che considereremo nel capitolo 10 (le «grandi teorie unificate supersimmetriche») predice con successo tale valore.

La forza forte è mediata dallo scambio di gluoni, i quanti del campo di colore creato dalle particelle portatrici della carica corrispondente (soltanto i quark e i gluoni portano la carica di colore; questa non è presente nei leptoni e nelle particelle γ, W^+, Z^0, W^-). La forza debole richiede tre bosoni per la trasmissione dell'interazione debole fra particelle di carica debole diversa. La forza di colore richiede, per mediare tutti gli effetti di questa interazione, otto gluoni, ognuno con una carica di colore diversa. «Forza di colore» e «forza forte» sono due nomi diversi per designare la stessa forza; la disciplina che se ne occupa si chiama «cromodinamica quantistica», in breve QCD. La forza forte lega i quark nei protoni e nei neutroni. Come abbiamo visto sopra, protoni e neutroni non hanno una carica di colore netta (sono «incolori»), come gli atomi non hanno una carica elettrica netta (sono elettricamente «neutri»). Ma come qualche residuo del campo elettrico trapela in un certo senso fuori di un atomo, cosicché si viene ad avere una forza che lega gli atomi nelle molecole (vedi la figura 4.2), così si ha anche un trasudamento della forza di colore all'esterno del protone e del neutrone. Questa forza di colore residua è la forza nucleare che lega i protoni e i neutroni nei nuclei degli elementi chimici.

Tutte le particelle hanno anche un'altra proprietà, chiamata «spin», la quale si comporta in modo analogo alla comune rotazione. La quantità di spin posseduta da una particella può essere espressa in termini di un'unità chiamata costante di Planck, h, e poiché in una teoria quantistica tutto

si presenta in quantità discrete, le particelle possono avere spin 0, 1/2, 1, 3/2 e via dicendo (l'unità base per lo spin è sempre $h/2\pi$, cosicché di solito si omette l'indicazione del tipo di unità). Nel caso delle particelle fondamentali della teoria standard si presentano solo i primi tre di questi valori. I bosoni di Higgs hanno spin 0; quark e leptoni hanno spin 1/2; e i quanti dei campi elettromagnetico, debole e di colore che mediano le forze (γ, W^+, Z^0, W^-, e i gluoni) hanno tutti spin 1. Tutte le particelle il cui spin è un multiplo semintero dell'unità base (rientrano in questo tipo solo quark e leptoni) sono chiamate fermioni (in onore del fisico italiano Enrico Fermi), mentre quelle il cui spin è un multiplo intero dell'unità base (γ, W^+, Z^0, W^-, gluoni, h) sono chiamate bosoni (in onore del fisico indiano Satyaendra Nath Bose). Benché il fatto di avere spin 1/2 o 1 possa apparire una piccola differenza, le proprietà e lo status di fermioni e bosoni sono molto diversi, sia dal punto di vista della costruzione di una teoria sia anche da quello del modo in cui si comportano quando sono presenti non isolatamente.

Ora posso passare a descrivere un aspetto molto bello e interessante della teoria standard. Nel corso dello sviluppo della fisica, l'apprendimento delle regole e quello delle forze furono processi indipendenti. Lentamente, però, man mano che si andava comprendendo meglio la teoria quantistica, ci si rese conto che regole e forze sono connesse. Oggi i fisici capiscono che, se non conoscessimo le forze, ma apprendessimo in qualche modo che esiste qualche particella materiale che trasporta un qualche tipo di carica (per esempio un elettrone che trasporta una carica elettrica), per potersi avere una teoria quantistica coerente dovrebbero essere veri due risultati. Innanzitutto, si dovrebbe introdurre un nuovo bosone (in questo caso il fotone), il quanto di un nuovo campo (in questo caso il campo elettromagnetico), e, in secondo luogo, le interazioni mediate da tale bosone sarebbero una nuova forza (in questo caso la forza elettromagnetica). Così, se esistono gli elettroni, la teoria richiede che debbano esistere anche i fotoni, ed è prevista la forma della forza elettromagnetica. (Per introdurre un'espressione del gergo tecnico, la classe di teorie che hanno le proprietà appena descritte vengono chiamate, per ragioni storiche, teorie di gauge.) Una volta che sappiamo che alcune particelle sono portatrici di una carica debole, sono predette l'esistenza dei bosoni W^+, Z^0, W^-, e le loro proprietà. Una volta che sappiamo che i quark sono portatori della nuova carica di colore, sono predette l'esistenza dei gluoni e loro proprietà. Se mai apprenderemo che i quark o i leptoni o qualche altra nuova particella sono portatori di un nuovo tipo di carica, sapremo che devono esistere nuovi bosoni associati di spin 1.

Le predizioni dell'esistenza dei bosoni W^+, Z^0, W^- e dei gluoni, e delle loro proprietà, furono fatte fra il 1971 e il 1973. Gluoni e bosoni furono effettivamente scoperti, con le proprietà che erano state correttamente previste, i primi nel laboratorio tedesco DESY, ad Amburgo, nel 1979, i secondi nel laboratorio europeo di ricerche nucleari, il CERN, nel 1983 e 1984. Predizione e rivelazione di queste particelle sono risultati di grande rilievo intellettuale. La predizione si fondò sul puro ragionamento, nel quadro di una teoria matematica che inglobava i risultati di tutti gli esperimenti e le intuizioni fisiche sulla natura accumulati nei secoli precedenti. Per poter essere verificate con i costosi esperimenti necessari per scoprire tali particelle, le predizioni dovevano essere accettate da persone in grado di convincere i governi a spendere centinaia di milioni di dollari (del 1977), e da centinaia di fisici, che avrebbero impiegato quasi dieci anni a costruire il collisore e i rivelatori necessari.

I quark, i leptoni e le cariche che conosciamo sono stati trovati in esperimenti. Non c'è ancora un principio che ci dica quali altri quark o leptoni o cariche possano esistere (se esistono), cosicché dobbiamo aspettare o nuovi dati sperimentali o la scoperta di un tale principio. Per i teorici delle particelle la connessione qui descritta fra particelle, regole e forze è estremamente interessante, rimandando a strutture teoriche ancora più potenti che ne permettano l'unificazione a un livello più profondo.

Le quattro forze sembrano essere, in un certo senso, l'insieme minimo, in contrasto con le particelle, in relazione alle quali non comprendiamo ancora il bisogno di famiglie, oltre a quella costituita dalle particelle più leggere (vedi però l'Appendice C). Senza la gravità non si formerebbero stelle e pianeti. Senza l'elettromagnetismo non ci sarebbero la luce e gli atomi. Senza la forza forte non esisterebbero i nuclei, cosicché il Sole sarebbe un corpo inerte e non irraggerebbe né luce né calore. Senza la forza debole sarebbero assenti i processi essenziali per l'evoluzione stellare, cosicché non ci sarebbero state esplosioni di supernovae e non si sarebbero formati gli elementi pesanti necessari per la vita. In assenza di una qualsiasi di queste quattro forze, non ci sarebbe stata vita.

La rinormalizzazione

Rimangono da descrivere altri due aspetti della teoria standard. Uno è il bosone di Higgs e la fisica associata; lo rimanderò al capitolo 8 perché è una parte non ancora compiuta della teoria standard, e perché, oltre a completare la teoria standard, rimanda al futuro.

L'altro è un'importante dimensione concettuale e storica. Esso ha a che fare con la difficoltà di formulare le regole. Capire come usare una teoria quantistico-relativistica dei campi dell'elettromagnetismo (la QED) era un compito molto arduo. La teoria fu formulata per la prima volta all'inizio degli anni '30, ma i tentativi di usarla per calcolare alcune proprietà osservabili di atomi e particelle diedero in principio soluzioni infinitamente grandi, anziché valori numerici significanti. Lentamente la comprensione progredì, ma il problema non fu risolto. Poi, nel 1974, fu finalmente misurata una quantità importante (detta « spostamento di Lamb », in onore di Willis Lamb, che lo misurò); tutti i tentativi di calcolarla avevano dato in precedenza risultati infiniti, ma una volta che fu finalmente misurata, l'incapacità di calcolare

per essa un valore significante parve molto più grave. Questo fatto stimolò prontamente i teorici a tentare approcci migliori e, fatto più importante, li convinse a prendere sul serio la QED e a calcolare con rinnovato entusiasmo. Intensi sforzi compiuti nel 1947 e 1948 ebbero successo, e permisero di mostrare che c'era un modo sistematico per eliminare le parti infinite e identificare il vero risultato numerico. Il procedimento fu chiamato « rinormalizzazione ». In passato il bisogno di rinormalizzare fu oggetto di aspre critiche, ma oggi comprendiamo le ragioni fisiche che sono alla base del procedimento, e i teorici sono concordi nell'ammettere che quello della rinormalizzazione è un approccio sensato. In anni recenti si è compreso che le rinormalizzazioni non pregiudicano il buon livello di una teoria e che la nostra comprensione di livelli di scala diversi in natura è mediata da rinormalizzazioni.

Quelle soluzioni infinite impedirono la formulazione di buone teorie dell'interazione debole o forte fino agli anni '70. Le teorie dell'interazione debole erano intrinsecamente più complicate dell'elettrodinamica quantistica, e i fisici non erano in grado di stabilire se fossero o no rinormalizzabili. Infine, nel 1971 a Utrecht, in Olanda, Gerhard 't Hooft (che era allora allievo di Martinus Veltman) riuscì a dimostrare che la teoria standard era effettivamente rinormalizzabile. Il sapere che la teoria avrebbe permesso di eliminare gli infiniti e di identificare le predizioni corrette fu un passo avanti essenziale verso il completamento della teoria: un passo altrettanto essenziale delle conferme sperimentali di cui ci occuperemo nei capitoli seguenti.

Supponendo che la fisica di Higgs (capitolo 8) venga infine risolta in modo soddisfacente, la teoria standard diventa una teoria quantistico-relativistica dei campi completa, la teoria più matematica e più generale che sia mai esistita. Essa include le regole della teoria quantistica e della relatività ristretta, e contiene l'intero elettromagnetismo (le equazioni di Maxwell). Descrive tutti gli esperimenti sulle particelle e le loro interazioni. Dal 1989 al 1993 al CERN si raccolsero vari

milioni di eventi sperimentali per verificare le previsioni della teoria standard, senza trovare alcun disaccordo significativo con la teoria. Per la prima volta nella storia non c'è alcuna contraddizione sperimentale o alcun rompicapo da risolvere nell'ambito della teoria. E ora essa abbraccia un dominio che si estende fino alla velocità massima (quella della luce), al limite dell'universo visibile, e a ritroso fino a un trilionesimo di secondo dopo l'inizio del nostro universo. La teoria standard è una conquista definitiva.

5
Gli impianti sperimentali

Per scandagliare la natura al livello delle particelle e le loro interazioni sono necessari impianti molto grandi e costosi

Il microscopio e il telescopio furono i primi strumenti usati dagli scienziati per estendere significativamente il raggio d'azione e l'acutezza dei sensi umani. Entrambi gli strumenti furono inventati in Olanda, dove l'ottica era allora molto sviluppata. Nel 1590 un occhialaio olandese si rese conto che, poiché le lenti convesse (usate per correggere la presbiopia) ingrandivano, due lenti convesse potevano ingrandire più di una. Egli situò due lenti agli estremi di un tubo e ottenne il primo microscopio. Costanti miglioramenti nella molatura delle lenti permisero un ingrandimento sempre maggiore; fra il 1670 e il 1680 Antoni van Leeuwenhoek ottenne ingrandimenti di 250-300 volte. Si dovette invece attendere fino al 1608 perché qualcuno notasse che una lente convessa e una concava opportunamente disposte formavano uno strumento utile per avvicinare oggetti lontani: un cannocchiale. La scoperta fu fatta durante la guerra dei Paesi Bassi contro la Spagna, e il telescopio fu immediatamente considerato un segreto militare e usato dagli olandesi per conseguire il vantaggio di un avvistamento anticipato dell'approssimarsi di navi e truppe nemiche. Nonostante gli sforzi dei Paesi Bassi per tenere segreta l'invenzione, la notizia dell'esistenza del nuovo strumento giunse entro un anno a Galileo, in Italia. Come accade molto spesso nella scienza e nella tecnologia, quando un esperto viene a sapere che una cosa è possibile riesce a realizzarla rapidamente (purché disponga delle risorse necessarie), cosicché ben presto Galileo ebbe fra le mani un cannocchiale che poté puntare verso il cielo. Egli si accorse prontamente che la Via Lattea è fatta di stelle, vide quattro satelliti di Giove orbitare

attorno al pianeta, e molte altre cose. Questi progressi nella tecnologia furono cruciali per lo sviluppo di nuove opportunità scientifiche. In data imprecisata dopo il 1592 Galileo inventò il termometro, e un po' dopo l'orologio a pendolo. Entrambe le invenzioni possono essere considerate prodotti secondari, inventati non per l'interesse che potevano avere di per sé, ma per il fatto che Galileo aveva bisogno di strumenti per misurare la temperatura e il tempo, nel perseguimento dei propri obiettivi scientifici primari. Da quel tempo in poi, scienza e tecnologia si sono continuamente stimolate a vicenda.

I collisori

Quattro secoli di progresso scientifico e tecnologico hanno condotto ai più grandi «microscopi» di oggi, i collisori della fisica delle particelle, i quali permettono ai fisici di «vedere» cose un bilione di volte più piccole di quelle che poteva osservare van Leeuwenhoek. Quando si scandaglia la natura così in profondità, non si può semplicemente osservare la realtà come con un microscopio, perché non ci sono oggetti che rimangano stabili. Si deve invece concentrare su una grande quantità di energia in una regione molto piccola, causandovi un'esplosione in miniatura, nella quale saranno create nuove particelle secondo le regole della teoria quantistica. Di solito, per sottolineare la grande quantità di energia (E) che può essere resa disponibile convertendo in energia una massa (m) – come per esempio in una centrale nucleare o in una bomba a idrogeno – si ricorre all'equazione di Einstein $E = mc^2$. I fisici delle particelle usano l'equazione in direzione opposta, fornendo energia e convertendone una parte in nuove particelle dotate di massa: essi creano in tal modo particelle che di norma non esistono nell'universo (perché sono instabili e decadono molto rapidamente, come abbiamo visto nel capitolo 1). Nella fisica delle particelle quest'approccio è così fondamentale che le unità usate per misurare la massa delle particelle sono le quantità equivalenti dell'energia necessaria per produrle.

Per procurarsi tale energia e concentrarla ci si fonda su due princìpi fisici. Innanzitutto, se si introduce in un campo elettrico una particella che trasporta una carica elettrica, questa viene accelerata e si muove più velocemente, cosicché viene ad avere più energia. In secondo luogo, una particella elettricamente carica, introdotta in un campo magnetico, si muove in cerchio attorno alla direzione del campo magnetico.

Un collisore si fonda su una quantità di dispositivi capaci di produrre un campo elettrico. Questi ricevono la loro energia nello stesso modo di un qualunque elettrodomestico: essenzialmente infilando una spina in una presa. Il passo seguente consiste nel prendere degli elettroni o dei protoni da atomi di idrogeno e introdurli nel campo elettrico. Queste particelle subatomiche vengono poi accelerate fino ad alte energie, secondo il primo principio descritto nel paragrafo precedente. Per portare gli elettroni o i protoni alle alte energie desiderate si richiedono molti dispositivi in sequenza, dal momento che ogni dispositivo può aggiungere solo un po' di energia. Allo scopo si usano grandi magneti, i quali incurvano in cerchio la traiettoria delle particelle facendo loro ripetere varie volte lo stesso percorso, così che guadagnino energia a ogni passaggio. Quanto più veloce è una particella, tanto più difficile è per i magneti incurvarne la traiettoria, così che è impossibile mantenere le particelle su una traiettoria circolare oltre un certo limite, fissato dalla loro energia. Nel caso di esperimenti che fanno entrare in collisione due fasci, l'intero processo descritto va attuato per ciascun insieme di particelle; quando i due insiemi hanno ricevuto un'energia sufficiente, vengono scagliati l'uno contro l'altro.

Se le particelle collidono frontalmente, perdono tutta la loro energia, concentrando una grande quantità di energia in una piccola regione di collisione. Questa è una situazione instabile, e la teoria quantistica ci dice che l'energia sarà

rapidamente convertita in un certo numero di particelle, ognuna delle quali si allontanerà dalla regione della collisione. Ogni singola particella puntiforme (quark e leptoni, bosoni *W* e *Z*, partner supersimmetrici se esistono – vedi il capitolo 10 –, e qualunque altra) ha una certa probabilità di emergere dalla collisione se l'equivalente in energia della sua massa è minore dell'energia disponibile. Un collisore che acceleri i suoi elettroni o protoni a energie superiori rispetto ai collisori precedenti sarà in grado di produrre particelle sia più pesanti sia in maggior numero.

In ogni collisione emerge qualche particella. Attualmente possiamo dire che la maggior parte di esse sono già state studiate in esperimenti precedenti. Le particelle interessanti si presentano solo di rado, cosicché si richiedono molte collisioni per produrle. La proprietà di un collisore che determina quante collisioni si verificheranno si chiama la sua « luminosità ». In un collisore reale fasci di elettroni o protoni sono accelerati insieme. Poi un fascio in movimento in una direzione viene diretto contro un fascio in movimento nella direzione opposta, e si spera che, quando i fasci passano uno attraverso l'altro, si verifichi una collisione. Di norma, ogni volta che due fasci si incontrano si ha solo una collisione, cosicché per ottenere più collisioni si fanno incontrare più volte i fasci in varie regioni di interazione, fornendo a un collisore vari rivelatori. La probabilità di una collisione è maggiore se un fascio contiene un maggior numero di particelle, o se si può ridurre la grandezza di un fascio (a parità di numero di particelle, ottenendone così una concentrazione maggiore) o se si può accelerare un maggior numero di fasci per secondo. La luminosità è, più o meno, una misura della capacità dell'acceleratore di produrre collisioni, a parità di tutto il resto. I due caratteri fondamentali di un collisore sono la sua massima energia e la sua luminosità.

Il campo della fisica chiamato « fisica degli acceleratori » si dedica a migliorare la nostra capacità di accelerare particelle. Esso è stato sempre più riconosciuto come essenziale per il

futuro della fisica delle particelle. Considerevoli ricerche innovative sono state intraprese nella direzione di conseguire energie superiori, pur concentrando ancor meno attenzione sulla luminosità.

Quali particelle vengano scelte per le collisioni è in gran parte una questione pratica. I protoni sono facilmente disponibili, relativamente facili da accelerare, e buoni per conseguire elevate luminosità. Ma l'interazione importante da studiare per apprendere la nuova fisica sono le collisioni fra le particelle puntiformi come i quark e i gluoni contenute in un protone e i quark e i gluoni contenuti nell'altro protone. Ogni protone è composto da tre quark e da un certo numero di gluoni, cosicché in pratica solo una piccola frazione dell'energia del protone (circa un decimo o anche meno) viene trasportata da ogni quark o gluone che colliderà realmente con un'altra particella. Il totale dell'energia disponibile per produrre nuove particelle è quindi al massimo il 10 per cento circa dell'energia originaria fornita ai due protoni.

Quest'inefficienza ha condotto gli scienziati a impegnarsi al massimo per poter sperimentare con elettroni anziché con protoni; essendo gli elettroni puntiformi, tutta la loro energia di collisione può essere usata nella produzione di nuove particelle. Per ragioni tecniche, la probabilità di produrre nuove particelle interessanti è maggiore se si fanno collidere elettroni e positroni (le antiparticelle degli elettroni), non a causa dell'energia che viene liberata nella loro annichilazione, ma perché la carica elettrica risultante è nulla, mentre, se entrano in collisione due elettroni, oltre a tutte le interessanti particelle create devono esserci due delle particelle finali che devono trasportare carica elettrica (dal momento che la quantità finale della carica elettrica non può mai cambiare). I positroni sono però difficili da ottenere, dal momento che quelli che vengono creati si annichilano immediatamente col primo elettrone che incontrano, rendendo ardua la costruzione di un collisore di elettroni e positroni di alta luminosità. Poiché in ogni protone sono presenti quark di entrambe

le cariche elettriche, questo problema non si pone per le collisioni di protoni.

All'uso degli elettroni è legata una seconda difficoltà. Se si fa muovere una particella elettricamente carica lungo una traiettoria curva, c'è una probabilità che essa emetta fotoni, i quali porteranno via con sé una parte della sua energia. Questa probabilità aumenta rapidamente al crescere dell'energia della particella, e al collisore LEP del CERN, che descriveremo più avanti in questo capitolo, tale probabilità è così elevata che una parte notevole dell'energia fornita va a finire in questa radiazione, anziché accrescere l'energia dell'elettrone. Questo non è un problema grave nel caso dei protoni, in quanto la probabilità di perdita di energia è minore per una particella più pesante (in ragione della quarta potenza della massa), e la massa del protone è quasi duemila volte maggiore di quella dell'elettrone. Ciò significa però che il collisore LEP del CERN è l'ultimo elettrosincrotrone costruito per lavorare alle frontiere della fisica. I futuri collisori di elettroni ad alta energia dovranno essere acceleratori lineari, e i fasci dovranno essere accelerati in linea retta ed essere fatti « cozzare » frontalmente.

In sintesi: si possono costruire collisori di protoni di grandissima energia e luminosità, ma queste macchine sono inefficienti in quanto usano nella produzione di nuove particelle meno del 10 per cento circa dell'energia loro fornita. I collisori di elettroni e protoni usano l'energia con efficienza molto maggiore, ma è molto più difficile costruire collisori di questo tipo ad alta energia o ad alta luminosità. I collisori di protoni sono molto più adatti per conseguire parecchi fra gli obiettivi della fisica attuale, fra cui la ricerca di nuove particelle di massa sconosciuta, ma forse un giorno la situazione cambierà. Più avanti in questo capitolo descriverò brevemente i collisori attualmente esistenti o in corso di progettazione.

I rivelatori

Per poter imparare la nuova fisica sperimentando con gli acceleratori, non solo si deve far sì che le collisioni di particelle vi avvengano con energie abbastanza elevate e con una frequenza sufficiente, ma è necessario anche essere in grado di rivelare le particelle emergenti e di riconoscere e registrare i nuovi risultati che eventualmente vi si verificassero. La maggior parte delle particelle più pesanti prodotte in un collisore (W, Z, c, b, t, τ, oltre a qualsiasi altra particella non ancora scoperta) sono instabili, con una durata di vita molto breve, cosicché percorrono una distanza troppo corta per poter essere rivelate direttamente. La loro esistenza dev'essere invece dedotta dal comportamento delle particelle in cui esse si convertono nel loro decadimento. Per esempio, dalle collisioni emergono spesso elettroni e positroni. In generale questi possono avere quasi qualsiasi energia. Ma se derivano, diciamo, dal decadimento di un bosone Z in un elettrone e un positrone, la loro energia totale dev'essere uguale all'equivalente in energia della massa di Z. Le energie di tutti gli elettroni e i positroni che emergono in un evento dato vengono perciò controllate per verificare quest'equivalenza e se, questa viene confermata, l'elettrone e il positrone vengono sostituiti nell'analisi di tale evento da un bosone Z. Questo tipo di analisi viene ripetuto per tutte le particelle che emergono nell'evento, e ripetuto ogni volta che si compie una tale identificazione, fino a quando l'evento non può essere ulteriormente semplificato. A quel punto si controlla il numero di eventi di ogni tipo confrontandolo col numero predetto dalla teoria standard. Si è potuto riconoscere qualcosa di nuovo grazie al verificarsi di un numero di eventi di un particolare tipo maggiore di quello predetto dalla teoria standard. La caratteristica grazie alla quale una nuova particella può essere riconosciuta viene chiamata la sua « firma ». La firma di un quark *top* è costituita da eventi con un muone, un elettrone, due getti di adroni (derivanti da quark) e una certa energia mancante; la probabilità di vedere eventi così

caratterizzati causati da qualcosa di diverso da un quark *top* è molto bassa, cosicché quando al Fermilab si trovano vari eventi di tale tipo si può essere certi di avere scoperto un quark *top*. Il collisore del Fermilab è l'unico a disporre di energia sufficiente alla produzione di quark *top*, e tale resterà fino a quando non sarà stato costruito l'LHC (Large Hadron Collider, ossia il grande collisore di adroni) al CERN, forse nel 2005.

Fra tutte le particelle, nel rivelatore emergono solo elettroni (e), muoni (μ), neutrini (ν) e adroni. Un rivelatore è formato fondamentalmente da vari strati, ognuno dei quali risponde in modo diverso ad almeno una di queste particelle, cosicché la particella, dopo avere attraversato tutti gli strati, risulta perfettamente identificata (vedi le figure 5.1 e 5.2). L'energia della particella viene allora misurata con una di due tecniche: o la particella perde la sua energia all'interno del rivelatore entrando in collisione con particelle del rivelatore stesso, nel qual caso l'energia si dissipa in calore che viene misurato; oppure si costruisce all'interno di un magnete una camera per tracce. In questo caso la particella è soggetta all'influenza del campo magnetico, di cui è costretta a seguire le linee del campo magnetico; poiché l'entità della curvatura dipende dal rapporto fra l'intensità del campo e l'energia della particella, diventa possibile misurare quest'ultima.

Si presentano due casi speciali. Per ragioni che spiegheremo più diffusamente nel capitolo seguente, i quark non appaiono come singole particelle cariche ma come sottili «getti» di adroni. I neutrini, inoltre, presentano solo interazioni deboli, tanto deboli da non interagire affatto nel rivelatore dell'acceleratore; una volta che un neutrino sia stato creato nella collisione o in un decadimento, si sottrae immediatamente al rivelatore. Per fortuna può essere ancora scoperto grazie al fatto di portare con sé energia: se si somma l'energia di tutte le particelle prodotte nell'evento, il risultato dovrebbe essere uguale alla quantità originaria; in caso contrario si suppone che l'energia mancante nell'analisi dell'evento sia

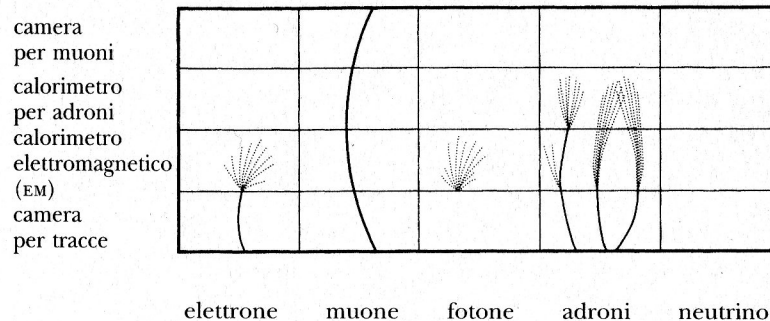



Figura 5.1. Disegno schematico della costruzione di un rivelatore che combina vari strati, ognuno dei quali risponde in modo diverso a uno o più tipi di particelle. Si suppone che l'intero rivelatore sia immerso in un campo magnetico, così che le particelle elettricamente cariche si muovano su linee curve. La camera per tracce è quella più vicina all'interazione, mentre la camera per muoni è quella più lontana. In una camera per tracce ogni particella carica lascia una traccia per mezzo di una qualche interazione con gli atomi del rivelatore; per esempio, può staccare elettroni dagli atomi che colpisce, e tali elettroni possono poi muoversi lungo fili ed essere contati al termine dei fili stessi. Le tracce di un evento, se vengono tutte da una singola collisione, dovrebbero avere la loro origine in un singolo punto. Un calorimetro elettromagnetico (EM) è fatto di materiali scelti in modo tale che qualsiasi particella elettricamente carica vi perda energia, e più facilmente se è più leggera, cosicché gli elettroni vi perdono di norma la maggior parte della loro energia, e gli adroni una parte minore. Anche i fotoni interagiscono facilmente con gli elettroni nel calorimetro EM, dove perdono la loro energia. Un fotone può essere distinto da un elettrone in quanto il fotone viene rivelato solo nel calorimetro EM, mentre l'elettrone manifesta la sua presenza sia in esso sia nella camera per tracce. Gli adroni (pioni, protoni ecc.) sono osservabili nella camera per tracce se sono elettricamente carichi, dopo di che perdono una parte della loro energia nel calorimetro EM e la parte restante nel calorimetro per adroni. La traccia dei muoni è osservabile in tutti gli strati. Essi sono soggetti all'interazione elettromagnetica ma sono 200 volte circa più pesanti degli elettroni, cosicché perdono energia meno facilmente, e quasi tutti i muoni attraversano i calorimetri senza interagire. Qualsiasi particella che compia l'intero percorso fino alle camere per muoni (che in realtà sono solo un altro strato di camere per tracce) sarà con ogni probabilità un muone. Infine, i neutrini non si manifestano direttamente in nessun elemento del rivelatore, ma asportano energia (come si dice nel testo). Ognuno di questi elementi del rivelatore dovrebbe essere concepito come uno strato sferico che circonda il punto di collisione

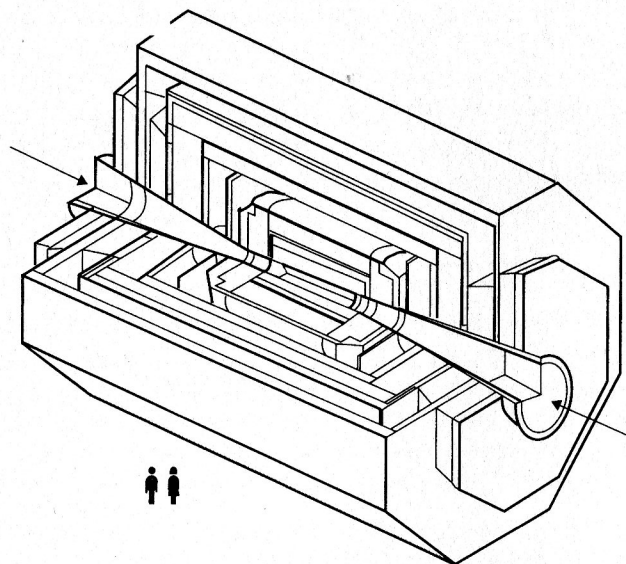



Figura 5.2. Schema di un possibile rivelatore per un futuro acceleratore di particelle, come l'LHC del CERN. Le due persone in primo piano servono a dare un'idea della scala. I diversi elementi corrispondono grosso modo a quelli illustrati nella figura 5.1. Le frecce indicano i fasci che collideranno al centro del rivelatore

stata trasportata via da un neutrino. Se il tipo di evento risultante non è uno predetto dalla teoria standard, è chiaro che ci si trova di fronte a qualcosa di nuovo.

Ci sono varie condizioni che rendono la costruzione di un buon rivelatore un compito difficile e impegnativo. Il principale è la rarità, già menzionata, degli eventi interessanti. Un nuovo esperimento potrebbe aver luogo a energie superiori rispetto ai precedenti, cosicché potrebbe ora verificarsi qualche processo per il quale non c'era in precedenza energia sufficiente; oppure un nuovo esperimento potrebbe avere una luminosità superiore, permettendo di scoprire qualche processo che era prima troppo raro per poter essere osservato. L'obiettivo è quello di riconoscere qualche evento inatteso, anche se le particelle reali che emergono nel rivelatore

sono solo elettroni, muoni, fotoni, neutrini e getti di adroni. In un protosincrotrone, la « congettura » iniziale che l'evento possa essere interessante deve verificarsi a una scala di tempo dell'ordine di un milionesimo di secondo, cosicché dev'essere fatta da un computer. Una seconda decisione, se salvare o no una registrazione di un evento, dev'essere presa in forse in un millesimo di secondo, anche in questo caso da un computer. Inoltre ogni misurazione contiene qualche errore, e il cumulo degli errori nell'analisi complessiva necessaria per interpretare un evento potrebbe annullare la possibilità di distinguere fra due interpretazioni, cosicché la precisione delle misurazioni è cruciale. Per costruire un rivelatore all'altezza dei suoi compiti si richiede una conoscenza profonda ed estesa dell'elettronica, dei computer, della scienza dei materiali, delle tecniche di ingegneria e degli obiettivi della fisica. Durante lo sviluppo di ogni rivelatore di fisica delle particelle le frontiere della tecnologia vengono spinte un passo avanti.

I laboratori e i loro acceleratori e rivelatori

A causa del loro costo e della loro complessità, nel mondo ci sono solo pochi laboratori di fisica delle particelle. In ogni laboratorio acceleratori lineari e anulari si sono evoluti nel corso del tempo, e hanno avuto vari rivelatori. Oggi ogni rivelatore è così complesso che occorrono centinaia di fisici, ingegneri e tecnici per costruirlo. Risultati e scoperte sperimentali vengono perciò associati ai rivelatori più che agli individui, anche se una o più persone possono essere state essenziali per la costruzione di un acceleratore o di un rivelatore e del suo modo di funzionare. Ora vorrei presentare in breve i principali impianti oggi esistenti, per potermi nel seguito riferire ad essi e informare il lettore sui laboratori in cui si eseguono i singoli esperimenti. In tutti i laboratori sono state compiute importanti misurazioni e scoperte. Il mio intento qui non è quello di fornire una storia, ma solo di riunire

una descrizione degli impianti principali. Ad essi mi riferirò in tutto il libro, e particolarmente nel prossimo capitolo, in cui descriverò gli esperimenti eseguiti in questi laboratori.

Per questa breve descrizione avrò bisogno di unità in cui esprimere le energie delle particelle: la scelta più semplice è forse quella di usare gli elettronvolt (eV). Poiché i numeri possono essere molto grandi, si usano spesso prefissi: M per mega, che sta per milione (MeV), G per giga che significa miliardo (GeV) e T per tera, bilione (1 TeV = 10^{12} eV). Il prefisso « tera- » appare particolarmente in vocaboli di biologia, nel senso di « mostruoso ».

Lo Stanford Linear Accelerator Laboratory e l'SLC

Il laboratorio che ha avuto forse maggior successo dal punto di vista della teoria standard è stato lo Stanford Linear Accelerator Laboratory (SLAC) a Palo Alto, in California. Varie fra le scoperte principali che sono alla base della teoria standard furono compiute qui. All'inizio degli anni '60 fu costruito allo SLAC un acceleratore lineare lungo 3,2 km, in grado di accelerare elettroni fino a 17 GeV. Quando quegli elettroni furono usati per scandagliare in profondità dei protoni, si trovarono i quark. (Il capitolo 6 contiene brevi descrizioni di un certo numero degli esperimenti base.) A cominciare dall'inizio degli anni '70, un piccolo collisore circolare di elettroni e positroni detto SPEAR (la cui energia totale poteva variare da 2,5 GeV a circa 5 GeV) permise allo SLAC di acquisire nuovi dati, scoprendo il quark incanto, il leptone tau e molte altre cose. (Benché lo SPEAR sia stato chiuso da tempo per la fisica delle particelle, oggi viene usato come « sorgente di luce da sincrotrone », ossia fondamentalmente come una sorgente di raggi X ad alta energia per studiare materiali e sistemi biologici. Quest'importante area della fisica fu resa possibile come conseguenza secondaria dell'esistenza degli acceleratori sviluppati per la fisica delle particelle.) Lo SPEAR aveva un rivelatore, chiamato MARK I.

Per evitare la perdita di energia di elettroni e positroni in

movimento circolare, all'inizio degli anni '80 ci si cominciò a impegnare nella costruzione di un collisore lineare di elettroni, fondato su un'idea ingegnosa sviluppata da Burton Richter. Attraverso un uso appropriato dell'elettronica e della nuova tecnologia, nel già esistente acceleratore lineare dello SLAC, potenziato fino a 50 GeV, divenne possibile accelerare ad alte energie sia elettroni sia positroni. Alla fine del percorso, la traiettoria degli elettroni veniva incurvata a semicerchio da un lato e quella dei positroni dall'altro, cosicché essi potessero incontrarsi ed entrare in collisione frontalmente. Poiché, al momento del loro incontro, avevano compiuto solo mezzo cerchio anziché molti cerchi, la loro perdita di energia era minima. Questo acceleratore, chiamato SLC, può oggi raggiungere un'energia totale di 100 GeV. Esso fu progettato sia per essere un dispositivo di ricerca e di sviluppo per futuri collisori lineari, sia per compiere esperimenti, e ha avuto un grande successo in relazione al primo obiettivo; in questo senso dovrebbe essere considerato il primo collisore lineare, destinato a essere seguito da altri più grandi e migliori. Ma sia perché il conseguimento di un'elevata luminosità risultò essere molto difficile sia anche perché il progetto fu affrontato disponendo solo di fondi minimi, l'SLC poté cominciare a fare ricerche significative solo nel 1993; esso dovrebbe compiere misurazioni importanti nei prossimi anni. L'SLC ha un grande rivelatore, chiamato SLD (figura 5.3). Nel 1993 fu approvato il progetto di costruzione, da parte dello SLAC, di una « fabbrica di quark *b* » di elevata luminosità, per studiare l'effetto chiamato violazione *CP* (della coniugazione di carica e della parità; vedi Appendice C). La fabbrica di quark *b* comincerà a raccogliere dati quando l'SLC completerà il suo programma di fisica, verso la fine degli anni '90.

Brookhaven

Il primo grande acceleratore costruito dopo la seconda guerra mondiale fu quello del Brookhaven National Laboratory,

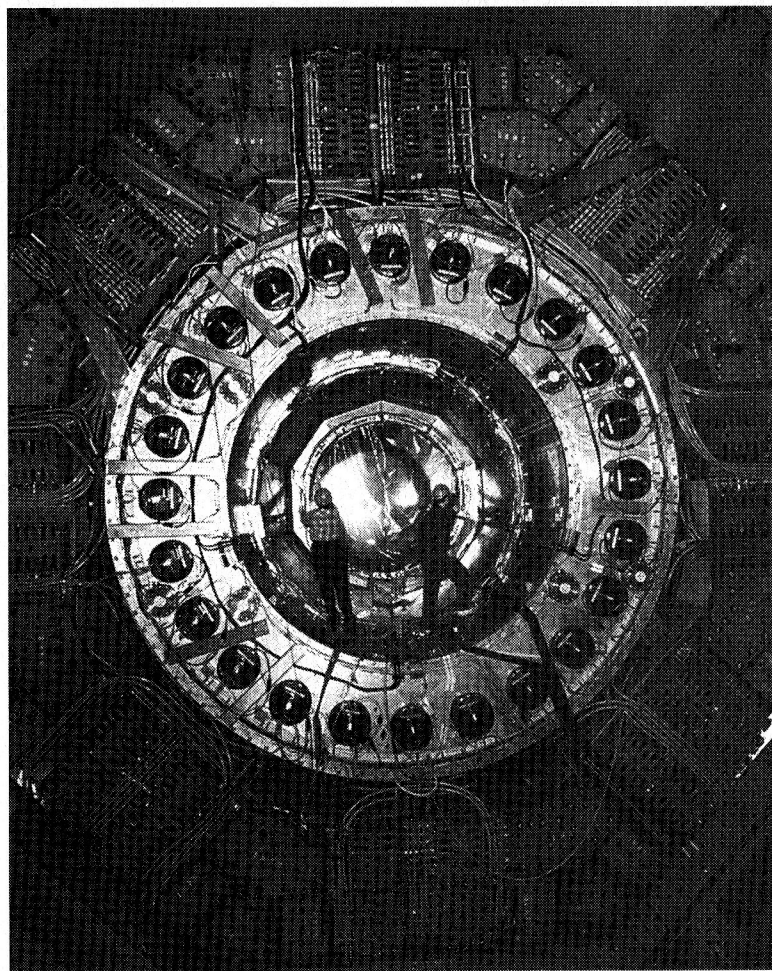



Figura 5.3. Vista terminale del rivelatore SLD nell'acceleratore SLC. I fasci sono perpendicolari alla pagina, ed entrano in collisione fra loro all'interno del rivelatore. (Fotografia riprodotta per gentile concessione del Dipartimento dell'Energia/SLAC)

in Long Island, nello stato di New York. Esso accelera protoni fino a 32 GeV, colpendo poi con essi dei bersagli fissi, con produzione di fasci secondari di neutrini (di cui ci occuperemo nella sezione seguente) e di altre particelle, che possono poi essere osservate e studiate. Qui fu scoperto indipendentemente il quark incanto, come pure vari fenomeni importanti che condussero alla teoria standard.

Il Fermilab

L'impianto a più alta energia attualmente esistente al mondo è il collisore di protoni e antiprotoni al Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab), appena fuori Chicago. I suoi fasci di protoni e antiprotoni hanno energie di 1 TeV. Le collisioni avvengono in due regioni di intersezione. I rivelatori presenti in queste regioni si chiamano CDF e D0, e ognuno di essi è stato costruito e viene usato da un gruppo formato da varie centinaia di fisici. La massima priorità al Fermilab è la scoperta diretta del quark *top* e la misurazione della sua massa e di altre proprietà. Il collisore del Fermilab è anche un buon posto in cui cercare nuove particelle più pesanti, come i partner supersimmetrici (capitolo 9), che speriamo ci dicano come estendere la teoria standard. Si potrebbe aumentare rapidamente e senza grandi spese la luminosità del collisore del Fermilab di un fattore di forse 100, cosa che lo trasformerebbe in un potente acceleratore utilizzabile nella ricerca di un bosone di Higgs, e accrescerebbe di molto la sua capacità di cercare nuove particelle.

Il CERN: il LEP e l'LHC

Il principale laboratorio europeo di fisica delle particelle è il CERN, che si trova a Ginevra, in Svizzera. Come lo SLAC, il CERN è stato ripetutamente potenziato e nel corso di tre decenni ha differenziato le sue macchine. L'acceleratore più importante è oggi il LEP, un collisore circolare di elettroni e positroni con un'energia iniziale totale capace di raggiungere i

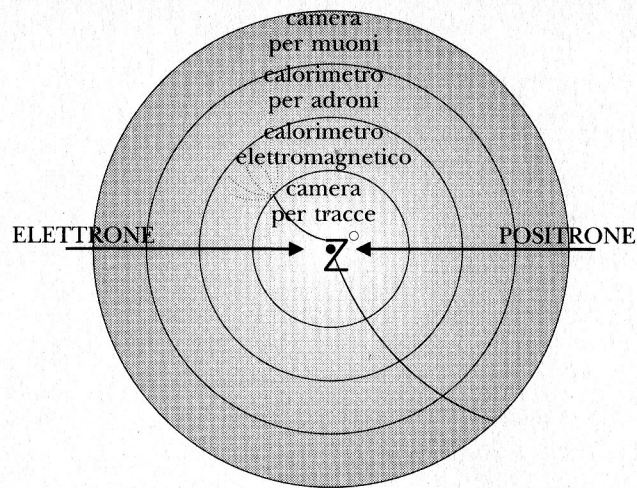



Figura 5.4. Questo diagramma illustra come potrebbe apparire un evento in un rivelatore e come lo si analizza. Gli strati (sferici) sono gli elementi del rivelatore, come nella figura 5.1. Un elettrone e un positrone si urtano e producono un bosone Z^0. Questo evento potrebbe essere rivelato nel modo seguente. Nella camera per tracce compaiono due tracce. Secondo i criteri illustrati nella figura 5.1, una è stata lasciata da un elettrone e l'altra da un muone. Dopo l'analisi, risulta che la somma dell'energia totale dell'elettrone e quella del muone non è quella che si avrebbe se le due particelle provenissero dal decadimento di un bosone Z^0; inoltre la produzione di un elettrone più un muone non è una delle forme di decadimento permesse di un bosone Z^0, cosicché l'evento non è identificato inizialmente come un decadimento di una particella Z^0. Tuttavia un processo previsto dalla teoria standard è il decadimento di un bosone Z^0 in un leptone tau più un leptone antitau, seguito quasi immediatamente da quello del tauone in un elettrone più un neutrino più un antineutrino, e dal decadimento dell'antitauone in un antimuone più un neutrino più un antineutrino. Vengono rivelati solo il muone proveniente dal decadimento di un tauone e l'elettrone proveniente dall'altro tauone; i tauoni stessi decadono prima di aver percorso un millimetro: una distanza troppo breve per poter essere osservata. Poiché i neutrini si sottraggono alla rivelazione, tale ipotesi potrebbe descrivere questo evento, cosicché si sottopone a prova l'ipotesi e si trova che funziona. Se l'evento non è spiegato da alcun processo della teoria standard, si provano nuove idee. Ogni nuova idea suggerisce altri tipi di eventi che potrebbero verificarsi, e che vengono quindi cercati. Se il leptone tau non fosse già stato scoperto in precedenza, avrebbe potuto essere scoperto in questo modo, in relazione a una nuova forma di decadimento del bosone Z^0. Quale traccia lasci il muone e quale l'elettrone si può vedere confrontando questa figura con la 5.1

100 GeV, che ha compiuto molte misurazioni di una precisione senza precedenti allo scopo di verificare la teoria standard. Attualmente si sta aumentando la sua energia totale per portarla fino a 180 GeV, e forse infine ancor oltre. Il LEP ha quattro aree di collisione, in ciascuna delle quali è situato un grande rivelatore (rispettivamente ALEPH, DELPHI, L3 e OPAL). Il CERN ha progettato la costruzione di un grande collisore protone-protone, l'LHC, che dovrebbe forse cominciare a lavorare nel 2005; fino ad allora, si continuerà ad accumulare dati col LEP. L'LHC avrà un'energia totale quasi sette volte maggiore di quella del Fermilab,* e una luminosità più di cinquanta volte maggiore. Una vista del CERN, del LEP e dei suoi rivelatori è fornita nella figura 5.5.

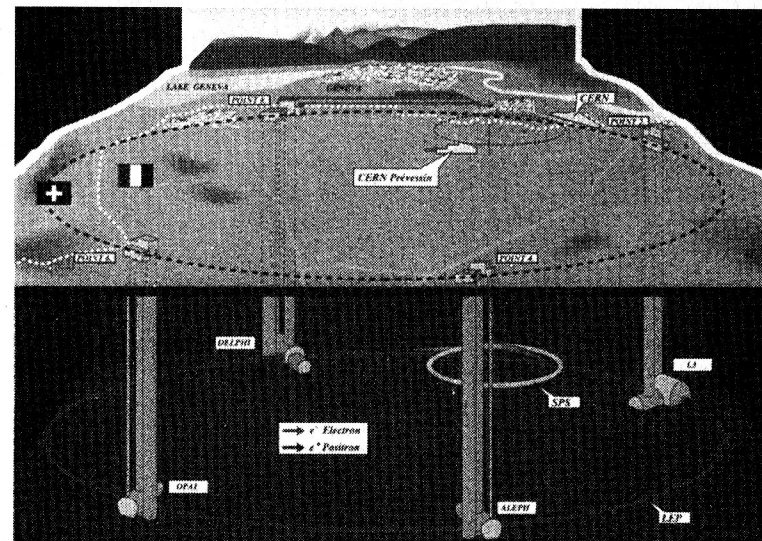



Figura 5.5. Figura schematica del laboratorio del CERN, in cui si vedono l'aeroporto e la città di Ginevra, con le Alpi sullo sfondo, e l'anello di accumulazione del LEP in primo piano. I quattro rivelatori si trovano a un centinaio di metri di profondità. Una parte dell'anello si trova in Francia e una parte in Svizzera (Per gentile concessione del CERN)

* Il collisore LHC, la cui costruzione è stata approvata dal Consiglio del CERN nel febbraio 1995, dovrebbe avere un'energia totale di 14 TeV ed essere terminato nel 2004. (*N.d.T.*)

DESY: PETRA e HERA

Il laboratorio più grande in Europa dopo quello del CERN è il DESY, in Germania, nei pressi di Amburgo. Il suo secondo collisore, PETRA, scoprì per primo i gluoni e confermò molte fra le predizioni sui getti di quark. Oggi il DESY ha un collisore di elettroni e protoni più potente, chiamato HERA, che produce collisioni fra protoni con un'energia di 800 GeV ed elettroni a 30 GeV, e viene usato particolarmente per studiare in che modo quark e gluoni si leghino nella formazione di protoni.

Altri collisori

Vari altri laboratori di fisica delle particelle sono distribuiti in tutto il mondo: il KEK, con il collisore TRISTAN, e con una fabbrica di quark *b* in costruzione, a Tsukuba in Giappone; un collisore di elettroni a Novosibirsk e un collisore di protoni in costruzione a Serpuchov in Russia; un piccolo collisore di elettroni in Italia; una versione migliorata del collisore SPEAR dello SLAC, noto con la sigla inglese BEPC, che produce un gran numero di quark incanto e di leptoni tau e che ha compiuto un'importante misurazione della massa del leptone tau, a Pechino; e un collisore di elettroni, il CESR, che produce una grande quantità di quark *b* e che ha compiuto molte importanti misurazioni delle loro proprietà, alla Cornell University a Ithaca, New York. Tutti questi impianti hanno compiuto e stanno compiendo misurazioni importanti di proprietà di quark e leptoni, e hanno eseguito test significativi della teoria standard.

Esperimenti a bassa energia e senza acceleratori

In tutto il libro si insiste particolarmente sul ruolo dei grandi acceleratori nello stabilire e confermare la teoria standard, ed è giusto che sia così perché le energie accessibili ai collisori degli ultimi due decenni furono decise in modo tale da trovarsi nella regione naturale in cui cercare i bosoni *W* e *Z*, i getti di quark e di gluoni ecc.: le particelle della teoria standard. Quando, in altri capitoli, ci occuperemo del completamento e dell'estensione della teoria standard, i collisori svolgeranno ancora un ruolo cruciale, ma c'è anche un altro insieme di esperimenti che è essenziale. Gli esperimenti compiuti con i collisori sono paragonabili a sparare un proiettile contro una pesca per scoprire se ha o no un nocciolo; l'approccio senza acceleratore è un po' come stare ad aspettare che la pesca marcisca per vedere se al suo interno c'è un nocciolo, e osservare una quantità di pesche per vedere se ce n'è qualcuna che marcisca più rapidamente delle altre. Eventuali risultati positivi forniti da qualcuno degli esperimenti seguenti ci condurranno immediatamente al di là della teoria standard, e ci indicheranno in che modo estendere la teoria stessa.

La rivelazione del decadimento del protone

Le teorie che unificano quark e leptoni (vedi il capitolo 11) prevedono che i quark di un protone possano trasformarsi in leptoni, cosicché il protone può decadere. Le ricerche del decadimento del protone compiute negli anni '80 avrebbero potuto, secondo le previsioni di alcune teorie, osservare tale fenomeno, ma così non fu; esperimenti più sensibili sono in corso attualmente in Italia attraverso una forma di collaborazione principalmente europea, mentre un altro esperimento ha luogo in Giappone, con la collaborazione di fisici americani e di altri paesi.

Questi esperimenti sono imprese notevoli. Le prime stime della durata di vita di un protone prima di decadere parlavano di 10^{30} anni, una durata molto lunga rispetto alla vita dell'universo (10^{10} anni). Non abbiamo quindi alcun motivo per preoccuparci che i neutroni presenti nel nostro corpo possano decadere, e non abbiamo alcun motivo per metterci a guardare un particolare protone e aspettare che decada. La teoria quantistica ci dice però che le particelle instabili possono decadere in qualsiasi momento, cosicché, se potessimo

introdurre in un recipiente più di 10^{33} protoni, ogni giorno ne potrebbe con ogni probabilità decadere qualcuno. Si decise allora di fare questo esperimento, costruendo un serbatoio di venti metri di lato nel sottosuolo, in una miniera di sale (non lontano da Cleveland), così che il terreno sovrastante potesse assorbire le particelle dei raggi cosmici, che avrebbero potuto simulare il decadimento di protoni. Il serbatoio fu riempito d'acqua. Poiché il protone poteva decadere (dando per esempio un positrone e due fotoni) in qualsiasi punto del serbatoio, l'acqua doveva essere abbastanza limpida da permettere a un fotone di percorrere vari metri fino a raggiungere un rivelatore su un lato della vasca. Come osservò una volta uno degli sperimentatori, se si riempisse lo stadio del football americano di Detroit con un'acqua così limpida, si potrebbe facilmente osservare una partita dalle gradinate più alte. (Dopo uno studio accurato dei metodi più raffinati per depurare l'acqua, gli sperimentatori trovarono che certi dispositivi della Culligan, importante società per il trattamento e la rigenerazione dell'acqua, avrebbero funzionato perfettamente. Chiamarono la direzione nazionale della Culligan, e appresero che l'unica unità disponibile per fare il lavoro si trovava a Ann Arbor, nel Michigan, che era proprio lo stato in cui volevano fare i loro esperimenti.) Purtroppo nei primi esperimenti (quello nei pressi di Cleveland, uno simile in Giappone, un altro con un sistema di rivelazione diverso nel Minnesota e uno in Europa) non si osservò alcun decadimento di protoni. L'accertamento sperimentale del decadimento del protone è però molto importante, cosicché attualmente sono in corso altri due esperimenti, uno in Giappone e uno in Italia, entrambi con rivelatori cento volte più sensibili rispetto a quelli della generazione precedente.

La misurazione della massa del neutrino

Benché nella teoria standard i neutrini abbiano massa nulla, non c'è alcun principio che lo richieda, e varie estensioni

della teoria implicano che i neutrini abbiano masse piccole. Per più di un decennio sono stati tentati esperimenti per misurare la massa dei neutrini, e vari esperimenti più sensibili sono in corso attualmente. Alcuni importanti esperimenti fondati su una collaborazione internazionale (con rivelatori sotterranei in Canada, Russia, Italia e Giappone) si propongono di rivelare neutrini emessi dal Sole (il comportamento dei neutrini solari dipende dalla loro massa).

Anche questi rivelatori sono situati in profondità nel sottosuolo per scongiurare la possibilità che particelle dei raggi cosmici causino eventi apparenti che potrebbero essere scambiati per eventi autentici. I neutrini solari, come tutti i neutrini, sono assai poco interagenti (ecco perché possono evadere dal Sole), ma è possibile costruire un rivelatore abbastanza grande da giustificare la previsione che ogni pochi giorni un neutrino solare interagisca nel rivelatore. Il primo di tali esperimenti ebbe inizio verso la fine degli anni '60 ed è ancora in corso. Fu un tour de force tecnico e concettuale, condotto da Ray Davis e collaboratori. Essi erano convinti che qualche neutrino proveniente dal Sole dovrebbe essere assorbito da un nucleo di cloro, dando un elettrone e un nucleo di argo. Calcolarono che, per ottenere un assorbimento circa per settimana, si dovesse riempire un serbatoio con quasi 400.000 litri di liquido contenente cloro. Il serbatoio fu costruito nella vecchia miniera d'oro di Homestake, a Lead, in South Dakota. Per fortuna un comune detersivo, il tetracloroetilene, è composto in gran parte da cloro, cosicché il riempimento del serbatoio non costò una somma esagerata. Il serbatoio veniva svuotato ogni pochi mesi, e dai 10^{30} atomi del serbatoio veniva estratta ogni volta una dozzina (!) circa di atomi di argo: un fatto davvero meraviglioso. Per convincere se stessi (e il mondo) che tali atomi potevano essere davvero quel che cercavano, gli sperimentatori eseguirono dei « test di calibrazione », introducendo a volte un numero noto di atomi di argo per poi ritrovarli. Questo esperimento riuscì a rivelare per la prima volta neutrini solari, ma i neutrini scoperti furono in quantità minore della metà circa

rispetto al numero previsto. I dati ottenuti da esperimenti affini hanno convinto sempre più i fisici che questo è un deficit reale, la cui causa potrebbe essere un effetto sottile possibile solo nell'ipotesi che i neutrini abbiano una massa. Il problema non è ancora risolto, e sono in corso vari esperimenti nel tentativo di chiarirlo e di misurare la massa dei neutrini, ammesso che sia veramente questa la causa del deficit.

Al CERN, a Brookhaven, al Fermilab e a Los Alamos si studiano con una tecnica diversa fasci di neutrini creati in collisioni del fascio di protoni per cercare di stabilire se essi abbiano effettivamente una massa. I neutrini vengono prodotti sparando dei protoni contro un bersaglio metallico. Dalle collisioni emergono grandi quantità di mesoni, barioni, fotoni, muoni e neutrini. Magneti situati dietro il bersaglio incurvano la traiettoria di ogni particella dotata di carica elettrica. Sulla traiettoria rettilinea vengono posti particolari materiali per far loro assorbire tutte le particelle che non vengono deviate (fotoni, neutroni ecc.). Dopo pochi metri riescono a proseguire la loro corsa solo i neutrini, i quali interagiscono troppo debolmente per essere assorbiti. Grandissimi rivelatori vengono situati da questo punto in avanti sulla traiettoria per studiare le interazioni dei neutrini, con la speranza di poter registrare qualche evento ogni mese. Il numero degli eventi osservati, e alcune proprietà dettagliate degli eventi stessi, forniranno informazioni sulle masse dei neutrini. Questi sono esperimenti importanti e difficili.*

Alla ricerca di decadimenti proibiti

Nella teoria standard si può fare un elenco di tutte le interazioni e i processi semplici a cui quark, leptoni e adroni possono essere soggetti. (Nell'Appendice A si spiega come si procede in pratica.) Una volta terminato l'elenco si trova che alcuni processi semplici che possiamo immaginare come

* Vedi la nota a p. 73. (*N.d.T.*)

possibili senza far ricorso alla teoria non sono fra quelli previsti dalla teoria stessa. Si dice allora che questi processi sono « proibiti » dalla teoria standard. Un processo proibito è il decadimento $\mu \rightarrow e + \gamma$. Se questo processo avesse luogo allo stesso (« grande ») ritmo del normale decadimento del muone, la teoria standard sarebbe sbagliata; se invece si verificasse a un ritmo molto modesto, ci fornirebbe un indizio di cui abbiamo bisogno per estendere la teoria standard. Altri processi proibiti sono: kaone $\rightarrow \mu + e$, $\tau \rightarrow e + e + \bar{e}$, e altri processi affini. Esperimenti in corso in vari laboratori in tutto il mondo ricercano questi tipi di decadimento. Se si dovesse scoprire qualche decadimento proibito, la fisica delle particelle ne risentirebbe inevitabilmente qualche conseguenza importante.

Nel secolo scorso, e nel nostro fino agli anni '70, è stato l'esperimento a guidare la teoria nella fisica di base. (Ha fatto eccezione la teoria quantistica dopo il 1925; molte predizioni teoriche furono poi confermate, dimostrando che la teoria quantistica forniva in effetti le regole per descrivere la natura alla scala degli atomi.) A partire dal 1970 è stata di nuovo la teoria ad assumere la direzione della ricerca in fisica delle particelle, e ogni nuova scoperta è stata predetta dalla teoria, tranne forse una (quella del leptone tau). Oggi ci si sta impegnando particolarmente nel completamento e nell'estensione della teoria standard, che risulta ben confermata. In questa direzione si potrebbero sottoporre a test varie previsioni importanti, e nel corso di questi sforzi si potrebbero fare ancora varie grandi scoperte. Purtroppo gli impianti richiesti per fare tali esperimenti e pervenire a tali scoperte sono diventati grandi e costosi; allo scopo è infatti inevitabile far ricorso a « microscopi » più grandi. Al tempo stesso, però, negli ultimi decenni l'impegno della società nella ricerca di base è diventato sempre più incerto, specialmente negli Stati Uniti.

6

Le basi sperimentali della teoria standard

Gli esperimenti, i test, le predizioni e le postdizioni che forniscono alla teoria standard i suoi fondamenti

Una persona intelligente rimasta anonima ha coniato il proverbio moderno: « La teoria senza esperimento è come un uccello senza gambe ». Questo capitolo descrive le molte gambe su cui si regge la teoria standard. Quasi tutti gli esperimenti di cui ci occuperemo figurerebbero nell'elenco degli esperimenti più importanti di tutti i fisici delle particelle. Meno accordo ci sarebbe su quali lasciare fuori; benché infatti alcuni di essi abbiano svolto un ruolo di grande rilievo nel determinare lo sviluppo storico di questo campo di studio, una volta che le conoscenze da loro apportate furono incluse nella teoria, essi persero gran parte del loro interesse dal nostro punto di vista attuale. Altri esperimenti furono cruciali quando furono compiuti, ma furono poi soppiantati da altri, più diretti. Io concentrerò la mia attenzione sugli esperimenti che hanno fornito le conferme più esplicite di predizioni o spiegazioni di fenomeni. Alcuni di questi esperimenti sono stati già ricordati in capitoli precedenti, ma per completezza li menzionerò anche qui; in alcuni casi si tratta di singoli esperimenti; altri sono invece coordinati e integrati in ricerche più generali.

Alcuni esperimenti sono descritti in associazione col nome di uno o più sperimentatori, ma quasi tutti quelli che hanno condotto alla conferma della teoria standard hanno ricevuto in realtà contributi cruciali da parte di un gran numero di persone. Il fatto che queste profonde scoperte siano nate dalla collaborazione di gruppi di fisici non è casuale, cosicché non ho ritenuto opportuno dedicare un particolare spazio a nomi o aneddoti.

Gli adroni e le loro proprietà

Nel capitolo 2 abbiamo visto in breve come, negli anni '50 e '60, siano stati scoperti un gran numero di adroni: oltre a protoni, neutroni e pioni, furono trovati altri adroni, chiamati kaoni, lambda ecc., ognuno dei quali con qualche proprietà che lo differenziava dagli altri. Oggi si conoscono più di duecento adroni. Una volta supposto che gli adroni siano composti da quark, i teorici possono predire quali tipi di adroni dovrebbero esistere e quali no. È possibile inoltre predire lo spin e altre proprietà di ogni adrone. Dopo quarant'anni di ricerche in quest'area, possediamo una quantità di risultati notevolmente coerenti, benché spesso non sia possibile eseguire calcoli dettagliati a causa di problemi matematici di grande complicazione. La situazione attuale può essere compendiata così: 1) tutti gli adroni di cui è stata predetta l'esistenza sono stati trovati; 2) non è stato trovato alcun adrone di cui non fosse stata predetta l'esistenza; 3) tutte le proprietà degli adroni (centinaia di misure) sono oggi comprese qualitativamente, e a volte anche quantitativamente.

Il risultato forse più notevole dell'interpretazione degli adroni come oggetti fatti di quark fu la previsione della cromodinamica quantistica che potevano essere fatti di quark due tipi *diversi* di adroni: i « barioni » (comprendenti i protoni e i neutroni), composti di tre quark, e i « mesoni », formati da un quark e un antiquark; e questi due tipi sono in effetti ciò che esiste. Ci si attende che alcuni adroni addizionali (chiamati *glueballs*, « gluopalle ») siano fatti di soli gluoni, non di quark, ma si pensa che siano piuttosto pesanti, e non è stato ancora accertato se alcune particelle candidate che sono state osservate corrispondano davvero agli stati predetti. Nel complesso, dopo quarant'anni di studio degli adroni, la cosa più importante dal nostro punto di vista è che non c'è alcun indizio di problemi concernenti proprietà di adroni che metta in discussione la correttezza della teoria fondamentale, mentre ci sono molte prove fornite dagli adroni che confermano la teoria standard.

I quark dentro i protoni

Nel 1911 Rutherford bombardò atomi con proiettili ad alta energia e, grazie al fatto che alcuni di tali proiettili furono deviati a grandi angoli, scoprì l'esistenza del nucleo atomico. Si dovette attendere fino al 1968 per ripetere tale esperimento con protoni anziché con atomi come bersaglio. L'esperimento – già descritto nel capitolo 2 – fu compiuto allo SLAC e condusse alla scoperta di quark puntiformi all'interno del protone. È importante capire che, nei due casi, a suggerire che all'interno c'era un oggetto puntiforme non fu solo l'esistenza dei sorprendenti rimbalzi a grandi angoli, ma anche la possibilità di calcolare esattamente il numero dei rimbalzi a ciascun grande angolo, supponendo l'esistenza di un nucleo all'interno dell'atomo, e di tre quark puntiformi nel protone.

Benché questi esperimenti non dimostrassero direttamente l'esistenza dei gluoni, mostravano che i proiettili interagivano solo con metà circa della sostanza che componeva un protone. Questo era ciò che ci si poteva attendere usando proiettili come elettroni e neutrini, che non portavano alcuna carica di colore, nell'ipotesi che metà circa del materiale presente in un protone fosse formato da quark, e l'altra metà da gluoni, che legano insieme i quark (e che interagiscono solo con particelle portatrici di una carica di colore).

La forza forte è meno forte quando i quark sono molto vicini fra loro

Un risultato sconcertante si ebbe negli esperimenti del 1968 allo SLAC nei quali si scoprì la presenza di quark all'interno dei protoni. La previsione quantitativa menzionata poco fa, che implicava l'esistenza di particelle puntiformi nei protoni, doveva essere valida (per ragioni tecniche) solo quando l'energia del proiettile fosse stata grande rispetto all'energia di movimento tipica di un quark all'interno di un protone. La previsione risultò però essere valida anche per proiettili non molto energetici. Questo fatto suscitò allora un certo nervosismo nei fisici, perché, se un aspetto di una previsione è sbagliato, l'apparente accordo che si osserva altrove potrebbe essere casuale. Quando, all'inizio degli anni '70, si sviluppò quantitativamente la teoria della cromodinamica quantistica, si trovò – cosa degna di nota – che la forza di colore si comportava in modo molto diverso dalle forze elettromagnetica e gravitazionale. La forza di colore operava un po' come se i quark fossero attaccati agli estremi di un nastro di gomma: essa aumentava fra loro con la distanza, anziché diminuire come per le altre forze. In condizioni normali il nastro di gomma non era teso, e i quark si comportavano come particelle puntiformi libere, come si era trovato sperimentalmente. (L'espressione tecnica per quest'effetto è «libertà asintotica».) Ma quando il nastro era teso esercitava una forte attrazione e teneva i quark legati in un adrone, com'era stato osservato. Così il rompicapo spariva, e tornò a crescere la fiducia nella teoria standard.

Appaiono i quark come getti

La teoria della forza di colore fa varie predizioni inattese. Una di esse è che, se un quark viene colpito con forza in una collisione e separato dai quark a cui è legato, non emerge come una singola particella bensì come uno stretto «getto» di adroni. (Alcuni getti sono illustrati nella figura 6.2.) Le ragioni di questo comportamento sono piuttosto sottili. Fondamentalmente, un quark deve formare con altre particelle un adrone «bianco» (ossia privo di colore). Il modo più semplice per conseguire questo risultato è quello di trovare un antiquark e legarsi con esso in un mesone. La collisione con una particella ad alta energia ha condotto alla produzione temporanea di coppie quark-antiquark. Il quark colpito può catturare un antiquark, lasciando un mesone (di norma un pione, perché è il più leggero) e l'altro quark della coppia, che viene allora spinto dall'intensa forza di colore e che ripete quindi il processo. La situazione più probabile secondo la teoria è quella in cui l'energia del quark originario finisce per essere condivisa fra un certo numero di adroni,

piuttosto che finire principalmente in uno o due. Tali getti cominciarono a essere osservati negli anni '70, non appena nei grandi acceleratori divennero possibili collisioni a energia sufficientemente elevata.

Come in altre cose di cui ci siamo occupati, non è solo l'osservazione qualitativa di un fenomeno a essere convincente, ma c'è un aspetto quantitativo che è non meno importante. Nella fattispecie, si può prevedere la direzione che ha il getto di un quark quando emerge dalla collisione. Se i getti vengono prodotti facendo entrare in collisione un elettrone e un positrone, dopo un gran numero di eventi il numero di getti prodotti perpendicolari alla direzione dell'elettrone iniziale sarà la metà del numero di quelli prodotti nella direzione del moto dell'elettrone, con un ritmo regolare (noto) di variazione fra le due direzioni. (Questa è una previsione tipica nella teoria quantistica. Essa dice che, per ogni particolare collisione, i getti andranno in una qualche direzione particolare. Dopo molte collisioni, nella direzione perpendicolare dovrebbero accumularsi un numero di getti pari alla metà di quelli nella direzione del moto dell'elettrone, mentre un numero pari a 3/4 dovrebbero essere orientati a 45 gradi, e via dicendo.) Questa previsione dipende dal fatto che lo spin dei quark è di 1/2, cosicché l'intero getto degli adroni si comporta come se avesse lo spin atteso di un singolo quark, risultato che fu considerato sorprendente e bello anche dai fisici che se lo attendevano. Se i getti non fossero venuti da una particella di spin definito, la variazione dell'angolo avrebbe potuto assumere qualsiasi forma; per esempio, si sarebbero potuti produrre getti in ugual numero a ogni angolo. Se la previsione fosse stata per una particella a spin zero (anziché a spin 1/2), il numero di getti perpendicolari alla direzione dell'elettrone sarebbe stato massimo, anziché minimo, decrescendo a metà a 45 gradi, e non si sarebbero avuti getti nella direzione dell'elettrone, con una sensibile differenza rispetto alle previsioni per un quark di spin 1/2. Questi risultati, che confermavano la teoria standard, furono osservati per la prima volta allo SLAC negli anni '70, quando entrò in attività il suo collisore di elettroni-positroni detto SPEAR. I risultati divennero meno convincenti quando si stabilì che l'energia dello SPEAR era troppo bassa, e quando un nuovo collisore a energia superiore, il PETRA (nel laboratorio DESY ad Amburgo, in Germania), cominciò a fornire risultati contrastanti.

Il ritmo della produzione di quark ne misura lo spin e la carica elettrica e di colore

Prima della metà degli anni '70 i risultati delle collisioni elettrone-positrone sembravano eludere ogni tentativo di interpretazione. Al crescere dell'energia cresceva anche il numero degli adroni prodotti, ma in un modo che non sembrava interessante. Quando i dati furono reinterpretati in relazione alla produzione di quark, seguita dalla formazione di adroni da parte degli stessi quark, emerse un quadro semplice e potente, che condusse alla conferma di varie predizioni della teoria standard basilare (al collisore dello SLAC). In generale le particelle dotate di una carica maggiore interagiscono più fortemente, cosicché c'è una maggiore probabilità di produrle. Una delle proprietà più sorprendenti previste per i quark era una carica elettrica di grandezza diversa da quella degli elettroni o dei protoni: poiché un protone ha carica elettrica uno, la formazione di un protone con due quark su (u) e un quark giù (d) funzionerebbe se il quark su avesse carica +2/3 e il quark giù –1/3, in unità della carica del protone (2/3 + 2/3 – 1/3 = 1). Anche la seconda famiglia, del quark incanto (c) e del quark strano (s) (vedi la tabella 4.1), dovrebbe avere gli stessi valori, +2/3 per il quark incanto e –1/3 per il quark strano.

Quando elettrone e positroni entrano in collisione, conducono alla produzione di ogni quark e leptone in quantità ben precise. Ci si attende di conoscere la quantità di ogni quark (u, d, s ecc.) una volta che siano specificati il suo spin, carica elettrica e carica di colore. Se le particelle prodotte sono pesanti, una parte dell'energia delle particelle che en-

trano in collisione si trasforma nella massa delle particelle prodotte, cosicché non si possono produrre quark o leptoni più pesanti fino a quando le particelle che entrano in collisione non hanno un'energia sufficiente.

Per formulare la previsione possiamo usare come unità la probabilità di produrre il muone. Tutti i quark e i leptoni hanno lo stesso spin del muone, cosicché, se non contasse alcun'altra proprietà, dovrebbero formarsi nello stesso numero. Le regole ci dicono che il numero di tali particelle prodotto è proporzionale al quadrato della carica elettrica. Ci sono inoltre tre colori per ogni quark, e saranno prodotti tutti, ma un solo muone. La regola, allora, è: per calcolare il numero dei quark di un tipo dato prodotti relativamente al numero di muoni prodotti, si deve semplicemente elevare al quadrato la carica elettrica del quark e moltiplicare per tre, in considerazione dei tre colori. Il quark giù e il quark strano daranno ciascuno $3(1/3)^2 = 1/3$ del numero dei muoni. Il quark su e il quark incanto danno $3(2/3)^2 = 4/3$ del numero dei muoni. Quindi, quando c'è esattamente l'energia sufficiente a produrre quark su e giù e strani, il ritmo di produzione dei quark dovrebbe essere di 4/3 per il quark su, più 1/3 per i quark giù, più 1/3 per i quark strani, moltiplicato per il ritmo di produzione dei muoni: il totale è pari a due volte il ritmo di produzione dei muoni stessi. Una volta diventata disponibile l'energia aggiuntiva necessaria per produrre il quark incanto più pesante, il ritmo di produzione dovrebbe essere pari a 10/3 volte il ritmo di produzione del muone, e questo è effettivamente il valore osservato.

Come mostra quest'analisi, molte parti della teoria standard entrano nella predizione dei ritmi di produzione, e le previsioni furono confermate dai risultati. Ora, misurazioni del genere sono state compiute anche per energie molto più elevate. Esse hanno mostrato i valori attesi per il leptone tau e per il quark *b*, e nient'altro; ciò implica che fino alla massima energia finora disponibile non esistano altre particelle. A energie superiori ci attendiamo che venga prodotto anche il quark *top*.

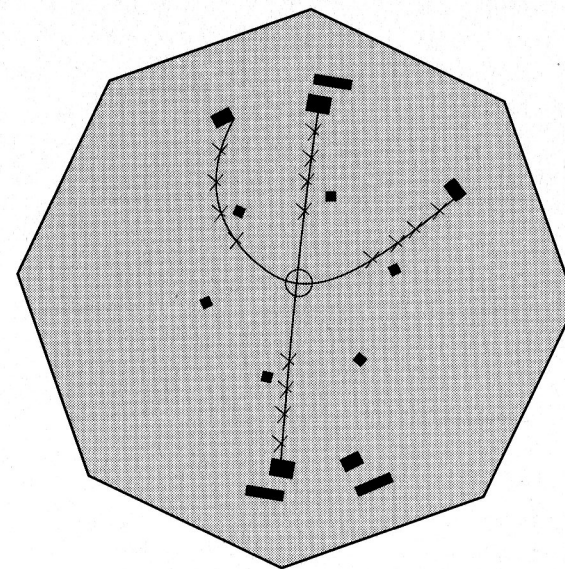



Figura 6.1. La scoperta del quark incanto ebbe luogo attraverso la scoperta di nuovi adroni, simultaneamente allo SLAC e a Brookhaven. Dopo la ricostruzione al computer, uno fra i primi eventi scoperti, che mostrava il decadimento di un adrone nel rivelatore allo SLAC, appariva come nella figura. Le crocette e i rettangoli indicano i punti in cui una particella elettricamente carica passava per un elemento del rivelatore. (Le due tracce curve possono essere identificate come pioni, e le tracce rettilinee come un elettrone e un positrone.) Il gruppo dello SLAC (i fisici che lavoravano al rivelatore MARK I), rifacendosi all'uso di lettere greche per dare nomi alle nuove particelle, aveva proposto di chiamare l'adrone fatto di quark incanto con la lettera greca ψ (psi). Il gruppo di Brookhaven aveva proposto invece il simbolo *J*. Poiché nessuna delle due denominazioni si è imposta sull'altra, quest'adrone è noto come « J/ψ »

La scoperta dei quark incanto

La scoperta diretta di adroni composti di quark incanto (figura 6.1) avvenne in un modo clamoroso nel novembre 1974. La scoperta fece rumore non solo per la forma dei dati, ma anche perché fu fatta indipendentemente da due gruppi (vedi il capitolo 2), uno allo SLAC e uno a Brookhaven. Non ci fu quindi alcun bisogno di attendere una conferma. Fino

allora, benché le prove a favore del quark e della teoria standard fossero andate crescendo, solo pochi fisici erano del tutto convinti dell'intero quadro, e molti erano ancora scettici. Ma il quark incanto, pur essendo puntiforme, era più pesante di un protone: una cosa che non era mai accaduta prima e che turbava molto i fisici, perché nessuno si attendeva che un quark privo di struttura fosse più pesante di un protone, che è fatto di altri quark. In meno di un anno furono scoperti altri adroni contenenti quark incanto, e ben presto la teoria standard fu saldamente stabilita come la teoria basilare della fisica delle particelle.

La scoperta dei gluoni

Una delle regole usate nel calcolo della produzione di quark nelle collisioni elettrone-positrone è che quark e antiquark devono sempre prodursi insieme, cosicché ogni evento dovrebbe presentare due getti. Poiché i gluoni sono portatori di una carica di colore, devono apparire anch'essi come un getto di adroni (ricordiamo che dalle collisioni possono emergere solo particelle prive di colore). Ben presto ci si rese conto che una prova diretta dell'esistenza dei gluoni avrebbe dovuto venire dall'osservazione di un terzo getto, dal momento che i gluoni (come i fotoni) potrebbero essere prodotti singolarmente. Eventi del genere furono cercati, e osservati per la prima volta (figura 6.2) nell'acceleratore PETRA al DESY nel 1979, a opera di vari gruppi di rivelatori. Sia la frequenza sia la direzione dei getti di gluoni erano in accordo con le previsioni della teoria standard.

Due neutrini, e poi tre

A Brookhaven, negli anni '60, furono compiuti vari esperimenti, i cui risultati furono incorporati nella struttura della teoria standard. Un esperimento particolarmente importante condusse alla scoperta che il muone aveva un suo neutrino, diverso da quello dell'elettrone. Non c'era alcuna ragione

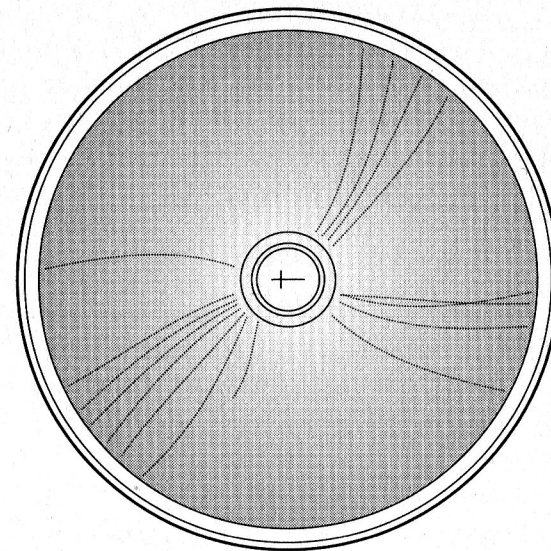



Figura 6.2. Questa figura (prodotta dal gruppo del rivelatore JADE all'acceleratore PETRA del laboratorio tedesco DESY, ad Amburgo) mostra tre getti di adroni. Due sono quark e antiquark, mentre il terzo è una prova dell'esistenza dei gluoni. In un evento particolare è impossibile identificare con sicurezza un gluone, ma se si dispone di un grande campione di eventi si può compiere l'identificazione in modo statistico

chiara per attendersi un secondo neutrino. Gli sperimentatori avevano cercato un particolare decadimento del muone, in un elettrone più un fotone, e non lo avevano trovato, benché esso fosse possibile secondo le conoscenze del tempo. I teorici cercarono di capire il risultato, e suggerirono che muoni ed elettroni potessero distinguersi per qualche altra proprietà oltre alla loro massa. In tal caso tale proprietà poteva essere condivisa anche dai loro neutrini. Se esistevano entrambi i neutrini, ed erano diversi, quando dei neutrini elettronici colpivano un bersaglio dovevano prodursi elettroni ma non muoni, e quando a colpire il bersaglio erano neutrini muonici dovevano prodursi muoni ma non elettroni. Questo test fu reso possibile da un abile progetto sperimentale di Leon Lederman, Melvin Schwartz e Jack Steinber-

ger. Essi eseguirono l'esperimento e trovarono che il neutrino dell'elettrone e quello del muone erano effettivamente particelle diverse. Dopo la scoperta del leptone tau, avvenuta una decina di anni dopo, un'accurata analisi delle sue forme di decadimento permise di dedurre che il neutrino del tauone era diverso dagli altri due neutrini. Se quei neutrini non fossero stati diversi, la struttura simmetrica della teoria standard non avrebbe funzionato (vedi l'Appendice B).

La scoperta dei bosoni W e Z

Alla metà degli anni '70 vari fra i principali fisici delle particelle erano convinti che la teoria standard fosse una buona descrizione della natura. A quel tempo erano già stati predetti ma non scoperti i gluoni e i bosoni W^+, Z^0 e W^-. Tutti si attendevano che i gluoni venissero scoperti dall'acceleratore del DESY, come infine avvenne, ma i bosoni di gauge elettrodeboli (*W* e *Z*) erano più difficili da rivelare. Il problema consisteva nella previsione che i bosoni elettrodeboli fossero pesanti: così pesanti che diventava difficile accettare la previsione stessa e che nessun impianto esistente poteva sperare di avere energia sufficiente per produrli. Si predisse che essi dovessero pesare press'a poco come un nucleo di cripto. Questo è un grosso oggetto composito, formato da trentasei protoni e circa quarantasette neutroni, ognuno dei quali è formato da quark e da gluoni. Eppure si supponeva che i bosoni *W* e *Z*, che dovevano avere un peso comparabile, fossero completamente puntiformi, senza struttura.

Sia il Fermilab negli Stati Uniti sia il CERN in Svizzera avevano protosincrotroni che potevano essere potenziati per produrre particelle *W* e *Z*, se era corretta la previsione delle loro masse e della loro frequenza di produzione fatta dalla teoria standard. Se invece la teoria fosse stata in errore e le particelle *W* e *Z* avessero avuto una struttura simile a un nucleo o addirittura a un protone, i loro ritmi di produzione sarebbero stati molto minori, e in nessuno degli acceleratori proposti si sarebbero osservati eventi. Gli Stati Uniti non mostrarono alcun interesse alla ricerca dei bosoni *W* e *Z*, mentre l'Europa si impegnò in essa, dando il via a una serie di decisioni che l'avrebbero mantenuta all'avanguardia nella fisica delle particelle. Il CERN si accinse alla costruzione di un acceleratore e di rivelatori per trovarli. Come abbiamo visto verso la fine del capitolo 4, circa otto anni dopo (nel 1983) furono scoperte alcune particelle *W* e *Z*. Ogni loro proprietà corrispondeva alle predizioni della teoria standard.

Molti esperimenti diversi trovano lo stesso angolo dell'unificazione elettrodebole

Come abbiamo visto nel capitolo 4, l'angolo dell'unificazione elettrodebole θ_w entra nella descrizione di molti esperimenti diversi. In assenza della teoria standard, la quantità chiamata θ_w in un esperimento avrebbe potuto avere un valore diverso rispetto alla quantità chiamata nello stesso modo in un altro esperimento. In realtà il suo valore è risultato essere lo stesso in quindici distinti esperimenti. Questa è una verifica estremamente importante della teoria standard. È una verifica particolarmente cruciale perché, se si fossero trovati valori di θ_w diversi in differenti misurazioni, non ci sarebbe stato alcun modo per salvare la teoria.

Molte conferme della teoria standard al LEP

Nel 1981 ebbe inizio al CERN la costruzione di un collisore di elettroni e positroni (il LEP) che sarebbe stato in grado di produrre milioni di bosoni Z^0. Fa impressione il fatto che fisici e ministri per la ricerca scientifica dei paesi membri del CERN abbiano avuto tanta lungimiranza, e fiducia nella teoria standard, da dare il via a questo progetto e da cominciarne la costruzione prima della conferma dell'esistenza del bosone Z^0, avvenuta nel 1984. Il LEP cominciò a raccogliere dati nel 1989 e ha collezionato a tutt'oggi vari milioni di eventi che sono stati analizzati dettagliatamente. Lo studio delle particelle *Z* e del loro decadimento ha permesso di

confermare le predizioni della teoria standard con una precisione decine di volte superiore a quella del passato. Molte predizioni sono state confermate a nuovi livelli di precisione, comprese varie miranti ad accertare se la teoria elettrodebole obbedisca alle regole della teoria quantistica, e se essa sia effettivamente una teoria rinormalizzabile (vedi la fine del capitolo 4). Nel loro complesso, i risultati del LEP mostrano che la teoria standard descrive molto bene la natura.

Il quark top

Un test importante della teoria standard era in corso nel 1994. Sin dal 1982 si sapeva che struttura della teoria, in combinazione con misure delle proprietà dei quark *b*, implicava che il quark *bottom* (basso) doveva far parte di un doppietto, come i quark su e giù, e i quark incanto e strano (vedi la figura 4.1). Nel doppietto, al quark *bottom* doveva accompagnarsi il quark *top* (alto). Esso non era però mai stato osservato direttamente in esperimenti, e la teoria standard non era in grado di predirne la massa. Misurazioni compiute al Fermilab a partire dal 1992 avevano fissato un limite inferiore alla sua massa; se infatti esso avesse una massa inferiore sarebbe già stato scoperto. Misurazioni di altre quantità al LEP, combinate con le richieste di coerenza della teoria, avevano fissato indirettamente un limite superiore alla sua massa. Se questa si trova effettivamente nella regione permessa risultante implicitamente dai dati del LEP, molti quark *top* saranno scoperti al Fermilab (supponendo che il collisore venga mantenuto in operazione con l'intensità prevista). In effetti, prove della rivelazione del quark *top* furono riferite all'inizio del 1994 dal gruppo del rivelatore CDF del Fermilab, e quando si disporrà di un maggior numero di dati la scoperta di questo quark dovrebbe essere considerata effettivamente conseguita. Nella primavera del 1994 il gruppo del CDF pubblicò la relazione preliminare *Evidence for the Top Quark...* I dati raccolti verso la fine del 1994 e nel 1995 dovrebbero condurre all'annuncio formale della scoperta.

Nessun esperimento è in disaccordo con le predizioni della teoria standard

Tutti i test sperimentali finora compiuti hanno confermato la teoria standard, o hanno contribuito a stabilirla. Un risultato forse non meno importante è che nessuna misurazione è in disaccordo con le predizioni della teoria standard, anche se molte avrebbero potuto esserlo. Ci sono due tipi possibili di disaccordo. Uno è il verificarsi di fenomeni non predetti dalla teoria standard, come la scoperta di una nuova particella (vedi per esempio il capitolo 10) o il decadimento di un protone (vedi il capitolo 5). Più che dimostrare un'insufficienza della teoria standard, la scoperta di nuovi fenomeni potrebbe fornirci preziose indicazioni su come estenderla. L'altro tipo di disaccordo sarebbe una contraddizione con la struttura interna della teoria. Per esempio, se vari esperimenti avessero fornito valori sensibilmente diversi di θ_w, o se i getti di quark non si fossero comportati come particelle di spin 1/2, o se diversi decadimenti di Z^0 si fossero verificati in proporzione sbagliata, o se fossero accadute decine di altre cose, la teoria standard sarebbe semplicemente sbagliata. Nessuna di queste cose si è verificata. Se al Fermilab non fosse stato scoperto il quark *top*, la teoria standard sarebbe risultata sbagliata.

7

Che cosa intendono i fisici con la parola « comprendere »?

La conoscenza delle particelle da cui sono composte le cose, delle forze che legano insieme le particelle e ne causano le interazioni e delle regole per calcolare il comportamento delle particelle stesse, non esaurisce tutti gli aspetti della « comprensione »

SAPENDO in linea di principio come calcolare il comportamento degli atomi, possiamo dire che li comprendiamo. Poiché però il valore della massa dell'elettrone, anziché essere dedotto dalla teoria, è per noi semplicemente un dato risultante da misurazioni – e poiché esso incide sulle proprietà degli atomi –, c'è un senso in cui non possiamo dire di capire a fondo gli atomi. Se analizziamo che cosa significa la parola « comprendere », potremo chiarirci il problema di come descrivere il livello della nostra comprensione.

Livelli di comprensione

Per spiegare i risultati ottenuti dalla fisica delle particelle, e gli obiettivi delle ricerche oggi in corso, ho trovato che è utile distinguere tre livelli di comprensione. Il primo livello, che è anche il più familiare, è quello della comprensione descrittiva. Altri due livelli, che chiamerò « comprensione dei dati e dei meccanismi » e « comprensione del perché », aiutano considerevolmente a chiarire il significato della parola. Entrambi sono piuttosto sottili, e specifici della fisica delle particelle, e per entrambi è difficile trovare analogie. Particolarmente estranei ci sono i criteri per distinguere la comprensione dei dati e dei meccanismi.

Forse un'analogia, per quanto imprecisa, potrebbe esserci utile per chiarire la distinzione fra i diversi livelli di comprensione. Se il mondo fosse un videoregistratore, e noi sapessimo usarlo bene e ricavarne il massimo di cui è capace, avremmo una comprensione descrittiva. Ovviamente il videoregistratore ci è stato dato così com'è, senza nessun manuale di istruzioni: per imparare a usarlo era essenziale la sperimentazione. A questo livello, però, non lo comprendiamo abbastanza bene per poterlo riparare se si rompe. La comprensione dei dati e dei meccanismi significa essere capaci di ripararlo senza alcun aiuto dall'esterno. La comprensione del perché comporta la capacità ulteriore di concepire l'idea di un videoregistratore, di progettarlo e di costruirlo a partire dalle materie prime senza alcun aiuto da parte di altri. È chiaro che la comprensione del perché è molto più difficile della comprensione dei dati e dei meccanismi.

Il primo livello: la comprensione descrittiva

Un campo specifico della scienza – per esempio la fisica delle particelle, la fisica dell'atomo, la microbiologia – ha conseguito una comprensione descrittiva del suo argomento se è in grado di fornire una descrizione completa e ben verificata di come le cose funzionano nel proprio ambito. A questo scopo si dev'essere in grado di prevedere correttamente i risultati di esperimenti, o almeno di interpretare esperimenti già eseguiti se le misurazioni implicano complicazioni troppo grandi perché si possano eseguire i calcoli in anticipo. Per esempio, Newton fornì una comprensione descrittiva del moto e della gravitazione, perché con le sue leggi divenne possibile partire da dati come le masse per poi descrivere il moto di tutti gli oggetti. Con la teoria standard, anche la fisica delle particelle, così come altre branche della fisica, ha conseguito una comprensione descrittiva del suo intero ambito.

In fisica delle particelle la comprensione descrittiva richiede una conoscenza dei tre tipi in cui ci siamo imbattuti la prima volta nel capitolo 2 dal punto di vista storico, e poi nel

capitolo 4 come modo di organizzare la teoria standard. Innanzitutto, per capire di che cosa siamo fatti, dobbiamo sapere quali *componenti* si trovino quando si suddivide la materia in parti sempre più piccole, e dobbiamo avere buoni argomenti per escludere che si possa procedere sempre oltre nella suddivisione. Ovviamente non potremo mai dimostrare che non si troveranno parti ancora più piccole se un futuro supercollisore potrà scandagliare distanze minori. Abbiamo visto però che la materia è già stata sondata a distanze molto minori di quelle a cui avrebbero potuto trovarsi strutture, cosicché può darsi che quelli che noi conosciamo oggi siano i componenti ultimi.

In secondo luogo, dobbiamo conoscere le *forze* che operano sui componenti legandoli nelle strutture in cui successivamente ci imbattiamo: ossia legando i quark in protoni e neutroni, i protoni e i neutroni in nuclei, i nuclei e gli elettroni in atomi, gli atomi in molecole e le molecole nel nostro corpo.

Infine dobbiamo conoscere le *regole* per calcolare come i vari componenti interagiscano sotto l'influenza delle forze, secondo la descrizione data nel capitolo 4. La relatività ristretta di Einstein e la teoria quantistica sono la forma moderna delle regole. Dagli anni '20 in poi le regole per il calcolo non sono cambiate in linea di principio, anche se c'è stato un grandissimo progresso nel capire come usarle.

Negli ultimi decenni si sono fatti grandi passi avanti nell'apprendimento dei componenti e delle forze. Prima degli anni '60 si conosceva l'elettrone, ma non si aveva alcuna idea di quali potessero essere gli altri componenti fondamentali. Prima degli anni '70 si conoscevano le forze elettromagnetica e gravitazionale, comprese le espressioni appropriate da usare per esprimerle nella legge di Newton o nell'equazione di Schrödinger della teoria quantistica. Si conosceva anche l'esistenza della forza debole, ma non si sapeva che cosa introdurre nelle regole per calcolarne gli effetti. La forza forte era ancora sconosciuta, anche se un indizio della sua esistenza era fornito da una delle sue manifestazioni, la forza nucleare.

Oggi la situazione è totalmente diversa: la teoria standard soddisfa tutte le condizioni per una comprensione descrittiva completa.

Il secondo livello: la comprensione dei dati e dei meccanismi

Il livello a noi meno familiare è il secondo: la comprensione dei dati e dei meccanismi. Esso ha origine nelle scienze in cui la comprensione descrittiva è matematica. Per conseguire questo livello occorre riconoscere i meccanismi con cui le cose funzionano, i quali possono comprendere la conoscenza di come si rompono le simmetrie della teoria (più avanti nel capitolo ne forniremo un esempio), o di quale soluzione di un'equazione descriva un sistema (vedi esempi sotto). La comprensione dei dati e dei meccanismi richiede anche che masse, costanti o parametri siano conosciuti direttamente e non siano derivati da misurazioni o da altre branche; essi devono essere derivabili dalla teoria della disciplina stessa. I dati (come le masse, o i valori delle forze) non si identificano con i meccanismi, cosicché si potrebbe parlare di una comprensione dei dati o di una comprensione dei meccanismi come di due cose distinte, ma il loro status logico sembra essere lo stesso, e a volte esse sono connesse (come nel meccanismo e nelle masse di Higgs, di cui ci occuperemo nel capitolo 8), cosicché pare sia lecito considerarle come lo stesso livello di comprensione.

Consideriamo, per esempio, la legge di gravitazione di Newton, la quale dice che due corpi sono attratti da una forza proporzionale al prodotto delle loro masse. Molti si chiedono da che cosa sia causata in realtà l'attrazione: quale sia il suo meccanismo. Newton non lo sapeva, né alcun altro lo seppe per più di due secoli. Una comprensione dei meccanismi non fu conseguita fin dopo il chiarimento della nozione di campo per opera di Faraday e di Maxwell nell'Ottocento, e fin dopo la dimostrazione data da Einstein che le variazioni di un campo (a causa del moto delle particelle) si

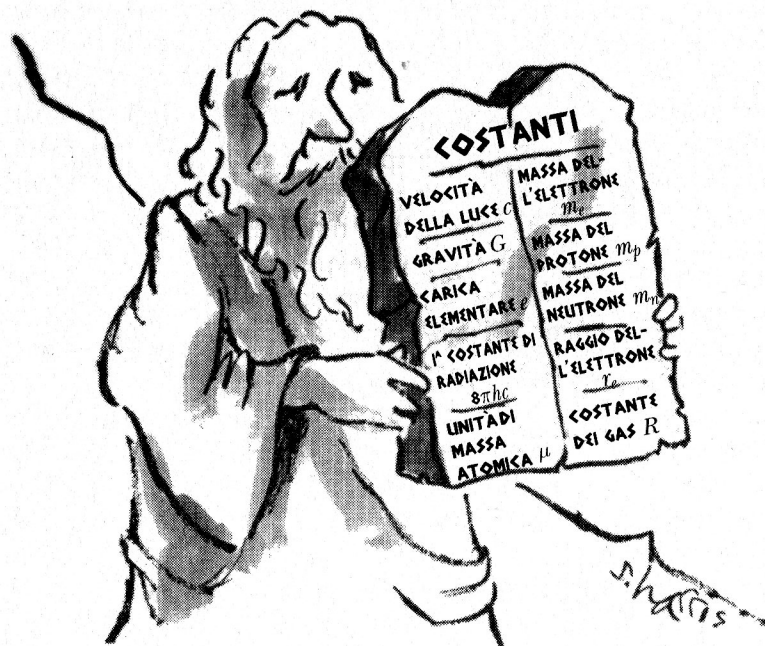
propagano alla velocità della luce. Fu allora risolto il problema tradizionale dell'« azione a distanza », e si capì il meccanismo con cui opera la gravitazione: ogni corpo dotato di massa crea un campo, e quando il corpo si muove la configurazione del campo si propaga dal corpo attraverso lo spazio alla velocità della luce; qualsiasi altro corpo dotato di massa percepisce il campo e ne viene attratto.

Quando studiavo fisica atomica e teoria quantistica all'università, si consideravano gli elettroni e i nuclei come dati, con la loro massa e certe altre proprietà, e con una forza agente fra loro con un'intensità caratterizzata dalla grandezza della carica elettrica presente su ciascuna particella. Il problema era quello di calcolare le proprietà degli atomi, come i loro livelli di energia, varie frequenze di accadimento osservabili sperimentalmente, i colori della luce che emettevano, e via dicendo. Tutti i risultati dovevano essere espressi in relazione a un'unità di massa, come la massa del protone, a un'unità di carica elettrica, come la grandezza della carica elettrica dell'elettrone, a un'unità di tempo e a un'unità di distanza. Quello sforzo ebbe così successo che quando ero studente io si insegnava che gli atomi erano ben compresi. Non ci si poneva domande sul *perché* la forza che legava l'atomo fosse quella che era, sul *perché* il protone e l'elettrone avessero la stessa grandezza di carica elettrica, sul *perché* le masse fossero quelle che erano e via dicendo. E così è ancor oggi; in ogni branca della fisica alcune quantità vengono introdotte dall'esterno e non spiegate.

I fisici delle particelle hanno conseguito una comprensione descrittiva del nostro mondo, ma non ancora una comprensione dei dati e dei meccanismi; per predire i risultati di esperimenti si devono infatti ancora introdurre nelle formule i valori delle masse di particelle ottenuti attraverso misurazioni. Si spera (vedi i capitoli 9 e 11) che i valori delle masse possano essere infine calcolati nell'ambito della teoria. Prima di conseguire una comprensione dei dati e dei meccanismi della fisica delle particelle si dovrà capire anche la fisica che è alla base del meccanismo di Higgs (capitolo 8). Ovviamente

la conoscenza di parti diverse della comprensione dei dati e dei meccanismi potrà essere conseguita in tempi diversi.

Quando si sviluppò la teoria standard, risultò che la forma matematica di ogni forza poteva essere derivata dalle regole della teoria una volta che si fosse congetturata l'esistenza della forza stessa (vedi il capitolo 4), e se si scopre un nuovo tipo di carica è richiesta persino l'*esistenza* di un nuovo tipo di forza. Questa situazione era intellettualmente più soddisfacente di una in cui le forze fossero completamente indipendenti dalle proprietà delle particelle e dalle regole, e stimolò un desiderio di derivare altri aspetti della teoria che in precedenza erano sembrati indipendenti. Purtroppo si sono fatti pochi progressi nella derivazione dei valori delle masse.

Ci sono dodici masse distinte di quark e leptoni, e due nuovi tipi di carica (carica di colore e carica debole, descritte nel capitolo 4), oltre alla carica elettrica. Benché le masse possano venire misurate, i loro valori non possono ancora essere predetti dalla teoria. Una volta misurate le masse, si può calcolare tutto ciò che ne dipende. Ci sono addirittura alcune quantità addizionali (capitolo 4) che devono essere misurate prima di poter incorporare in quella che possiamo descrivere come la teoria standard tutti i fenomeni del mondo quotidiano e tutti gli esperimenti compiuti con gli acceleratori. (È opportuna qui un'esortazione alla prudenza a proposito di cose che sono troppo complicate per poter essere calcolate in pratica: torneremo su quest'argomento nel capitolo 13.) Oggi, in fisica delle particelle, la mancata conoscenza di questa ventina di quantità è considerata intellettualmente inaccettabile, e si stanno facendo molti sforzi per tentare di estendere la teoria, così che si possano calcolare tutte le masse come rapporti a una massa elementare. Si esprime spesso quest'obiettivo dicendo che dovrebbero essere calcolabili tutti i rapporti di massa, come il rapporto della massa dell'elettrone a quella del muone o a quella del quark *top*. Obiettivi simili valgono per gli altri parametri, come le intensità delle forze. Il conseguimento di tali obiettivi ci condurrebbe oltre una comprensione descrittiva.

© 1994 by Sidney Harris

Occorrono almeno tre costanti fondamentali della natura per esprimere ogni altra cosa nella forma di rapporti: esse fissano le unità di misurazione. La scelta può essere fatta fra varie costanti, ma quelle oggi preferite sono oggi di solito la costante gravitazionale di Newton, *G*, la costante di Planck, *h*, e la velocità della luce (che potremmo chiamare la costante di Einstein), *c*. Anche se non le useremo molto in questo libro, val la pena di spiegarle un po' data la loro importanza. La comprensione dei dati e dei meccanismi implica essenzialmente che tutte le altre quantità misurabili vengano espresse in termini di queste tre costanti, o di costanti equivalenti.

La legge di gravitazione di Newton dice che due oggetti si attraggono con una forza gravitazionale reciproca che è proporzionale al prodotto delle loro masse diviso per il quadrato della distanza che li separa. Per completare la formula si deve specificare quanto sia intensa la forza gravitazionale che si esercita fra due masse particolari a una determinata distanza; a tal fine si devono moltiplicare gli altri fattori per una costante (che chiameremo *G*). Questa costante trasforma la proporzionalità in un'equazione. Similmente, un modo per caratterizzare l'innovazione fondamentale della teoria quantistica è quello di dire che i livelli di energia degli atomi non sono continui, bensì quantizzati. In altri termini, essi possono assumere solo certi valori e non i valori interposti. La distanza fra i singoli livelli è determinata dalla costante di Planck, *h*.

La teoria della relatività ristretta di Einstein consegue a due assunti. Il primo è che le formulazioni delle leggi fondamentali della natura non devono dipendere da dove le si studia: in un laboratorio situato sulla Terra, su un aereo in volo, o in qualsiasi altra parte nello spazio, o in qualsiasi altro sistema di riferimento in moto a una certa velocità relativamente a questi. Nessuno dovrebbe trovare a ridire in proposito. Il secondo assunto è più notevole. Esso dice che la velocità della luce (nello spazio vuoto) ha lo stesso valore in tutte le condizioni. In particolare, non dipende dalla velocità della sorgente luminosa. Questo fenomeno è molto diverso dalla nostra esperienza quotidiana. Se una persona lancia una palla con una certa velocità, e poi la lancia di nuovo mentre passa accanto a noi viaggiando su un'automobile, nel secondo caso la velocità della palla rispetto a noi sarà la somma della velocità ad essa conferita dal lancio più la velocità della macchina; la velocità non è la stessa nei due casi. La luce si comporta in modo diverso (e nello stesso suo modo si comportano anche altre cose, in moto con velocità prossima a quella della luce). Essa si propaga alla velocità *c* (pari a quasi 300.000 km/s) sia che venga emessa da una lampada stazionaria sia da una in movimento.

La comprensione dei meccanismi: rottura della simmetria delle equazioni

In fisica delle particelle, nella comprensione dei dati e dei meccanismi c'è un secondo aspetto. Anche se ci piacerebbe formulare un insieme di equazioni che costituisse la teoria alla base dei fenomeni, quel che osserviamo intorno a noi e negli esperimenti è descritto dalle soluzioni delle equazioni. Le equazioni hanno spesso (o almeno così si spera) una considerevole semplicità e simmetria, mentre lo stesso non vale di solito per le soluzioni. Spesso le equazioni hanno molte soluzioni; prima di poter fare predizioni è necessario sapere quali soluzioni corrispondano al nostro universo.

Un esempio semplice (fittizio) può aiutarci a chiarire questa situazione. Supponiamo che l'equazione fondamentale fornita dalla teoria che predice le masse dei leptoni elettrone, muone e tauone sia $E \times M \times T = 64$, dove E sta per la massa dell'elettrone, M per quella del muone e T per quella del tauone; l'equazione dice solo che, se si moltiplicano le tre masse, il prodotto che si ottiene è 64 (in unità appropriate). Quest'equazione ha varie soluzioni. Per esempio, tutte le masse potrebbero essere uguali, $E = M = T = 4$. Oppure due potrebbero essere uguali e più leggere e una più pesante, $E = M = 1$, $T = 64$; oppure $E = M = 2$, $T = 16$. Oppure due potrebbero essere uguali e più pesanti, $E = 1$, $M = T = 8$. Oppure le masse potrebbero essere tutte diverse, $E = 2$, $M = 4$, $T = 8$; oppure $E = 1$, $M = 4$, $T = 16$. In fisica, ovviamente, le equazioni sono molto più difficili da risolvere. Un modo di procedere è quello di risolverle tutte, per vedere se c'è qualche soluzione che assomiglia al nostro universo. Può capitare di lavorar sodo per mesi e mesi e trovare infine una soluzione che non assomiglia al nostro universo (mentre potrebbe esistere una soluzione diversa funzionante). Ma quand'anche trovassimo una soluzione somigliante al nostro universo, dovremmo ancora dimostrare che è la soluzione giusta: perché proprio quella invece di un'altra?

È opportuno notare una cosa importante: che l'equazione

originale per le masse è completamente simmetrica. Essa rimane invariata se si scambia il simbolo della massa dell'elettrone con quello di una delle altre due masse, quella del muone o quella del tauone ecc. L'equazione non distingue fra elettrone, muone e tauone. Le soluzioni possono però assegnare loro masse molto diverse. Oggi sospettiamo che la natura sia proprio così: ossia che le equazioni della teoria standard siano simmetriche sotto molti aspetti (alcuni sono descritti nell'Appendice B). Le equazioni hanno varie soluzioni diverse. Il mondo è descritto da una soluzione che non è simmetrica. Se essa potesse essere derivata, ci condurrebbe a una comprensione dei dati e dei meccanismi; alcune ricerche in tale direzione sono l'argomento del prossimo capitolo, dedicato alla fisica di Higgs.

L'espressione tecnica usata dai fisici per denotare la descrizione del mondo per mezzo di una soluzione non simmetrica di un'equazione simmetrica è « rottura spontanea della simmetria », e lo stato a cui si perviene in questo modo viene chiamato il « vuoto » scelto dalla rottura spontanea della simmetria. La comprensione dei dati e dei meccanismi richiede che, oltre a conoscere le equazioni della teoria, si spieghi perché lo stato vuoto del nostro mondo sia così com'è. Questa è un'ottica nuova nella storia della fisica. Essa compare nella teoria standard e in tutti i tentativi di estenderla, come pure in altre aree della fisica, fra cui la fisica della materia condensata.

Il terzo livello: la comprensione del perché

Il terzo livello – quello della comprensione del perché – è il più ambizioso. Per avere una comprensione della fisica delle particelle a questo livello si dovrebbe essere in grado di spiegare *perché* le cose sono come sono e *che cosa* siano realmente. Si dovrebbe poter derivare dalla teoria l'esistenza dell'elettrone, del muone e del tauone, i valori delle loro masse, e una spiegazione del perché esistano tre (e solo tre) di tali

particelle, diverse fra loro solo nella grandezza della loro massa. Si dovrebbe inoltre essere in grado di spiegare *che cosa* sia la carica elettrica, *perché* le forze siano quelle che conosciamo e non altre, e molte cose ancora. Benché una tale comprensione sia un bell'obiettivo, non è detto che sia realizzabile. Come dice un proverbio: « La semplice esistenza di un problema non dimostra che ne esista una soluzione ». La comprensione del perché è tuttavia un obiettivo importante nella ricerca di oggi (vedi il capitolo 11), dove essa è chiamata a volte « teoria di tutto ». L'aspirazione a una tale teoria è antica, ma ricerche concrete per conseguirla sono iniziate solo alla metà degli anni '80.

Storicamente, la comprensione del perché è sempre stata di competenza delle religioni e delle mitologie. Spesso i credenti chiedevano favori ai principali personaggi dei loro miti della creazione, mentre non chiedevano mai informazioni circa le tecniche di costruzione usate dai creatori. Non potevano porre tali domande perché il loro livello di conoscenza non bastava neppure a capire le domande, per non parlare delle risposte. Avendo conseguito una comprensione descrittiva – una conoscenza di come il mondo funziona –, noi chiediamo ora di poter conoscere gli strumenti e le regole. Come vedremo nel capitolo 11, la ricerca di una comprensione del perché avviene oggi legittimamente nel campo della scienza, quale che possa essere l'esito finale di tale ricerca.

Qualcuno ha sostenuto che gli esseri umani non potranno mai conseguire una « teoria di tutto » completa. E qualcuno pensa che la mente umana non potrà mai capire l'universo di cui è una parte, anche se nessuno ha mai fornito una ragione scientifica di questa convinzione. Altri pensano che, nel corso della storia, ogni nuovo sviluppo scientifico abbia suscitato nuove domande e che questo processo continuerà sempre, così che non si avranno mai risposte definitive. Non esiste però alcun argomento convincente neppure a sostegno di questa convinzione, e forse è pertinente l'analogia con l'esplorazione della superficie della Terra: l'esplorazione geografica è continuata per millenni, e ogni spedizione ha condotto all'apertura di nuovi orizzonti, ma infine si è conclusa nel XX secolo. Alcune persone, inoltre, provano una sensazione di disagio in relazione alle implicazioni religiose di una teoria di tutto.

In pratica, ovviamente, la ricerca andrà avanti. Dal tempo di Galileo la scienza ha progredito un passo per volta. Coloro che considerano importante la comprensione dell'universo si spingeranno più avanti possibile. Gli sguardi più o meno fuggevoli che abbiamo potuto gettare finora sul funzionamento della natura ci hanno mostrato linee di una bellezza severa, che non riusciamo però a osservare nella loro totalità. Forse non riusciremo ad andare oltre un certo limite o perché ci imbatteremo in barriere – intellettuali, tecnologiche o economiche – o perché la società considererà le spese per esperimenti troppo grandi in relazione al valore da essa attribuito alla ricerca scientifica e alla comprensione della natura. O forse, infine, giungeremo alla sospirata comprensione totale.

8
La fisica di Higgs

La fisica dei bosoni di Higgs o una qualche fisica affine è essenziale per completare la teoria standard e ci fornirà indizi su come estenderla

I BOSONI di Higgs (se esistono) sono i quanti che mediano un nuovo tipo di interazione, quello che dà origine alla massa. Attorno al 1915 si conoscevano elettroni e fotoni. L'elettrone fu il primo fra i dodici fermioni fondamentali (leptoni e quark) a essere scoperto, e il fotone fu similmente il primo fra i dodici bosoni, che trasmettono le forze della teoria standard (fotone, W^+, Z^0, W^-, e otto gluoni). Il bosone di Higgs (o higgsone), la cui esistenza fu predetta dalla teoria standard, è un nuovo tipo di particella, differente sia dai fermioni sia dai bosoni.

Una manifestazione della fisica che conduce ai bosoni di Higgs è già stata osservata, ma sottili proprietà della teoria standard ci hanno finora impedito di interpretarla. La luce (cioè i fotoni) può essere polarizzata in due direzioni, fenomeno che ci è familiare dagli occhiali da sole che impediscono il passaggio alla luce polarizzata in una direzione, allo scopo di ridurne l'intensità. Una proprietà simile vale per i gluoni. I bosoni *W* e *Z*, però, sono dotati di massa, che conseguono in virtù del « meccanismo di Higgs », di cui ci occuperemo più avanti. I bosoni dotati di massa hanno tre stati di polarizzazione invece di due. Il terzo stato viene incorporato attraverso la fisica di Higgs. Poiché le particelle *W* sono studiate al Fermilab – e dopo il 1996 saranno studiate anche al LEP, dove si studieranno pure le particelle *Z* – potremmo sperare di studiare gli stati della terza polarizzazione, che in verità sono un nuovo tipo di particella. Purtroppo, però, le richieste della relatività ristretta e della teoria quantistica fissano le proprietà del terzo stato di polarizzazione in modo

così completo che, studiando un singolo bosone *W* o *Z*, non possiamo apprendere nulla sulla sottostante fisica di Higgs. Per compiere progressi si devono studiare le collisioni di due bosoni *W*, o *Z*, a un'energia sufficientemente elevata, e la possibilità di farlo a livello sperimentale non è garantita da nessuna delle macchine attualmente in progetto.

Perché?

Lo stimolo per predire l'esistenza del bosone di Higgs non è la normale motivazione per le predizioni in gran parte della fisica. Se i bosoni di Higgs non esistono, non c'è infatti alcun disaccordo fra una predizione teorica e un esperimento esistente, nessun rompicapo empirico. La posta in gioco è invece l'esistenza di una teoria dotata di un significato. Nella sua forma base, la teoria standard è una teoria di particelle prive di massa. Tutti i leptoni, i quark e i bosoni devono essere particelle prive di massa; in caso contrario la coerenza della teoria è distrutta. Il fotone e il gluone, in effetti, non hanno massa, mentre tutte le altre sì. Perché non introdurre semplicemente una massa nelle equazioni che le riguardano? Purtroppo, in una teoria quantistica tutti gli aspetti della fisica sono così strettamente interconnessi che, se si introducono in essa le masse, i calcoli cominciano a fornire valori infiniti per le predizioni di molte misurazioni ordinarie. (Nel linguaggio che abbiamo usato nell'ultima sezione del capitolo 4, la teoria non è quindi rinormalizzabile.)

Durante gli anni '60 si apprese però che la teoria delle particelle prive di massa potrebbe essere modificata aggiungendo ad essa un nuovo tipo di campo: il campo di Higgs. La struttura sottostante della teoria non fu quindi modificata rimanendo quella di una teoria di particelle prive di massa qual era, e rimase rinormalizzabile; tutte le quantità sperimentali potevano quindi essere calcolate. Secondo la teoria, le masse delle particelle deriverebbero dalle loro interazioni col campo di Higgs, e potrebbero quindi essere introdotte

senza distruggere la coerenza della teoria stessa. Il processo per mezzo del quale le particelle ottengono una massa è il cosiddetto « meccanismo di Higgs ». Come i quanti del campo elettromagnetico sono i fotoni (i bosoni che mediano l'interazione elettromagnetica), così i quanti del campo di Higgs sono i bosoni di Higgs. Benché il meccanismo di Higgs permetta di includere masse nella teoria, non è abbastanza potente per permettere di predire i valori reali della massa di un qualsiasi quark o leptone, o la massa dello stesso bosone di Higgs, ma consente di predire (correttamente) le masse dei bosoni *W* e *Z* in termini di altre quantità misurate, e quindi di predirle numericamente. (La predizione delle masse dei bosoni *W* e *Z* è un successo importante, ma non va oltre una semplice comprensione descrittiva, in quanto tali masse sono connesse solo ad altre quantità di cui si usano i valori misurati.)

Il campo di Higgs ha una proprietà particolarmente inattesa. In fisica, lo stato in cui tutti i campi hanno la loro energia minima è chiamato il vuoto. Per la maggior parte dei campi – per esempio per il campo elettromagnetico – l'energia è minimizzata quando il valore del campo è dappertutto zero, cosicché il vuoto della fisica non ha in sé niente di permanente; è lo spazio vuoto che potremmo ingenuamente attenderci. Nel caso del campo di Higgs, i teorici congetturarono che l'energia associata al campo sia in realtà minore quando il campo ha dappertutto un valore costante (diverso da zero) che quando svanisce. Così nel vuoto il campo di Higgs non svanisce. Questo risultato e i suoi effetti sono chiamati il meccanismo di Higgs. (Per dire che nel vuoto il campo di Higgs non svanisce, si dice che ha un « valore di aspettazione del vuoto ».)

La teoria standard con un campo di Higgs è una teoria quantistico-relativistica coerente ed è del tutto accettabile in relazione a qualsiasi criterio storico in fisica. La soluzione che essa fornisce per includere le masse nella teoria è tecnicamente soddisfacente ed è superiore alla maggior parte delle alternative che sono state proposte. Essa introduce con successo la massa per i bosoni *W* e *Z*, per i quark e per i leptoni. Molti fisici delle particelle la considerano tuttavia con un certo disagio: alcuni perché l'intero approccio ha una natura *ad hoc* – il campo di Higgs è stato infatti introdotto per fare un certo lavoro, e lo fa bene, ma richiede che si facciano vari assunti, e quel che si aggiunge ha poche implicazioni osservabili che consentano altri esperimenti per verificarne la presenza –; e altri a causa delle sottili implicazioni teoriche della fisica di Higgs (queste implicazioni saranno introdotte nei capitoli 9 e 11). Il disagio si spiega in generale col fatto che nessuno capisce che cosa dia origine a un campo di Higgs. Il campo elettromagnetico ha origine da cariche elettriche, il campo di colore da cariche di colore, ma che cosa dà origine a un campo di Higgs?

In questo capitolo e in alcuni fra i capitoli seguenti entrerà in scena un altro elemento. Fin qui la teoria standard è un corpus di esperimenti e teoria consolidato e ben confermato. Da qui in avanti ci muoveremo in un territorio meno sicuro. Dovremo prendere in considerazione possibilità alternative e opinioni, poiché le ricerche sono ancora in corso.

La scoperta di un bosone di Higgs

Il problema della fisica di Higgs, ovviamente, sarebbe risolto se si scoprissero bosoni di Higgs, o se l'esperimento dimostrasse che non esistono. La difficoltà consiste nel fatto che – non essendoci predizioni teoriche della massa del bosone di Higgs – gli esperimenti devono cercare un bosone di Higgs di ogni massa possibile fino a scoprirlo o a dimostrare che non esiste. Fino a quando non cominciò a raccogliere dati, nel 1989, il collisore LEP al CERN non era stato possibile alcun esperimento che avesse qualche probabilità di scoprire un bosone di Higgs. Ora sappiamo che, se tale bosone avesse una massa inferiore a due terzi circa della massa del bosone Z^0, sarebbe già stato scoperto dal LEP; se fosse più pesante non avrebbe ancora potuto essere scoperto.

Quanto dovrebbe essere grande la massa di un bosone di Higgs? Nella teoria standard si può mostrare che, se l'higgsone esiste, la sua massa dev'essere inferiore a otto volte la massa della particella *Z*. Facendo un certo assunto plausibile, questa regione si contrae sensibilmente e la massa del bosone di Higgs risulta essere inferiore al doppio della massa di *Z*. Purtroppo l'acceleratore LEP non può estendere la sua ricerca fino a questi valori. Se il LEP scoprisse un bosone di Higgs la questione sarebbe risolta, ma fino allora non saremo in grado di apprendere alcuna nuova informazione definitiva.

Sia l'acceleratore LHC del CERN sia il nuovo NLC di cui vari paesi (Giappone, Germania, Stati Uniti) stanno contemplando la costruzione potrebbero infine coprire quest'intero intervallo di massa e scoprire un bosone di Higgs, se esiste, o dimostrarne l'inesistenza. Il collisore del Fermilab potrebbe essere potenziato in luminosità, in modo da scoprire o escludere un bosone di Higgs nell'intervallo di masse più interessante.

Diversi atteggiamenti verso i bosoni di Higgs

Quasi tutti coloro che hanno riflettuto a fondo sulla fisica di Higgs sono insoddisfatti del modo in cui essa viene formulata nella teoria standard. Si può però dimostrare che, se la forma più semplice di un campo di Higgs avente come quanti i bosoni di Higgs non è il modo in cui opera la natura, deve esistere un qualche altro tipo di fisica che abbia gli stessi effetti ai fini della produzione delle masse dei quark, dei leptoni e dei bosoni. A causa di questo vincolo, non si può ignorare il problema della fisica di Higgs. I contendenti si suddividono in tre campi principali.

Secondo alcuni l'idea di un campo di Higgs, e di un bosone di Higgs ad esso associato, è semplicemente sbagliata e sarà sostituita da un altro meccanismo ancora ignoto. I proponenti di questo approccio (che possiamo assimilare agli atei) hanno sostenuto che, quando un giorno si studierà

l'interazione di una coppia di bosoni *W*, si osserveranno presumibilmente nuovi effetti. Purtroppo anche il collisore più potente finora progettato, l'LHC del CERN, non avrà un'energia sufficiente a compiere uno studio generale di questa alternativa.

Un altro piccolo gruppo di fisici (gli «agnostici») concorda col primo nel non credere all'esistenza di un campo di Higgs fondamentale e di un bosone di Higgs. Essi pensano che si scopriranno, invece di campi di Higgs, varie nuove particelle materiali (quark e leptoni e forse anche altri tipi), e che si troverà che le nuove particelle sono portatrici di una o più cariche addizionali (come la carica di colore, ma con un numero di valori permesso maggiore di tre). Dovrebbero quindi esistere nuovi bosoni e nuove interazioni. Le nuove interazioni dovrebbero condurre a nuovi tipi di adroni composti delle nuove particelle, e alcuni dei nuovi adroni potrebbero svolgere il ruolo dei bosoni di Higgs. Secondo una variante di questa posizione, le nuove interazioni dovrebbero condurre a un'interazione particolarmente forte dei quark *top* (un'interazione speciale, in quanto il quark *top* è il più pesante fra tutti i quark, leptoni e bosoni della teoria standard); un adrone formato da quark *top* e *antitop* si comporterebbe quindi come il bosone di Higgs. Queste sono idee intelligenti e interessanti, e hanno ancora proponenti forti. Hanno avuto però meno successo di quanto non si sperasse, soprattutto per due ragioni. Una è che, pur essendo altrettanto efficaci del normale meccanismo di Higgs nell'introdurre nella teoria la massa per i bosoni *W* e *Z*, non riescono (o ci riescono solo facendo assunti molto artificiosi) a spiegare le masse dei quark e dei leptoni. In secondo luogo, i loro fautori devono sostenere che alcuni fra i successi più importanti degli approcci alternativi (che descriveremo nei prossimi due capitoli) sono accidentali e privi di alcun significato scientifico, dato che tali successi mancano al loro approccio.

La maggioranza di coloro che hanno riflettuto sulla fisica di Higgs (i «fondamentalisti») credono nella reale esistenza

dei bosoni di Higgs fondamentali, ma pensano che la teoria standard sarà infine inclusa in una teoria estesa in cui la fisica di Higgs risulterà meno arbitraria che nella teoria standard stessa. Per fortuna una tale teoria esiste già, ed è la teoria standard « supersimmetrica ». Alcuni fra i proponenti di questo approccio sono pervenuti ad esso grazie a vari caratteri attraenti delle teorie supersimmetriche stesse, altri perché la fisica di Higgs fa parte della teoria supersimmetrica (vedi capitolo 10), e un numero ancora maggiore perché le cosiddette « teorie di tutto », come le teorie delle superstringhe, che cercano di spiegare il nostro mondo, contengono automaticamente la teoria standard supersimmetrica. Nei due capitoli seguenti passeremo in rassegna gli argomenti che si possono addurre per estendere la teoria standard – anche se non ci sono indicazioni sperimentali della necessità di una tale estensione –, dopo di che descriveremo i guadagni che si conseguono aggiungendo la supersimmetria alla teoria standard. Se si considera la teoria standard dal punto di vista della supersimmetria cambia in modo radicale l'approccio alla fisica di Higgs.

In una teoria supersimmetrica è ancora necessario supporre l'esistenza dei campi di Higgs, ma una volta che la si sia accettata, scompare la maggior parte dell'arbitrarietà della teoria standard. Fatto estremamente importante, in quest'ultima è necessario fare degli assunti extra per attivare il meccanismo di Higgs che conferisce masse alle altre particelle, mentre nella teoria supersimmetrica tale meccanismo emerge come un risultato derivabile in modo elegante. Inoltre, benché la massa del bosone di Higgs non sia calcolabile neppure nella teoria supersimmetrica, l'intervallo ad esso consentito è più limitato, e in particolare ha un limite superiore ben stabilito che è molto al di sotto del doppio della massa di *Z*, il suo limite nella teoria standard. Il limite superiore imposto alla massa del bosone di Higgs dalla teoria supersimmetrica è al limite tecnico delle potenzialità del collisore LEP del CERN, anche se per estendere fino a quel punto la potenza del LEP si richiederebbero interventi molto costosi. La massa reale non è però necessariamente in prossimità di quel limite superiore, cosicché, se la natura è descritta correttamente da una teoria standard supersimmetrica, il bosone di Higgs potrebbe benissimo essere scoperto dall'acceleratore LEP del CERN. Il nuovo acceleratore proposto per il CERN (l'LHC) produrrà sicuramente un gran numero di bosoni di Higgs della teoria standard supersimmetrica (se tali bosoni esistono e se il collisore sarà infine costruito). In tale impianto (per ragioni tecniche) la scoperta del bosone di Higgs sarà possibile ma difficile, richiedendosi speciali rivelatori; se saranno o no costruiti rivelatori appropriati ancora non si sa. Se la luminosità del collisore del Fermilab fosse migliorata sufficientemente, anch'esso potrebbe scoprire il bosone di Higgs supersimmetrico.

La teoria standard sarà completa solo quando sarà risolto il problema della fisica di Higgs. Per stabilire se abbiano ragione gli « atei », gli « agnostici » o i « fondamentalisti » si richiedono esperimenti – i quali potrebbero scoprire o no bosoni di Higgs – e lo studio accurato delle proprietà di ogni nuova particella che potrebbe essere un bosone di Higgs. Il problema non potrà essere risolto dalle discussioni (anche se si è discusso molto, e molto ancora si continuerà a discutere), ma solo dai dati. Al tempo stesso, come indicano le diverse possibilità alternative che abbiamo descritto, il risultato degli sforzi che si stanno facendo per capire la fisica di Higgs mostrerà la direzione in cui si dovrà estendere la teoria standard.

9
La teoria standard verrà estesa

Nonostante il suo grande successo nel descrivere e integrare ciò che si conosce attualmente sulle particelle e le loro interazioni, la teoria standard non è la soluzione definitiva

SE la teoria standard è così buona e così ben stabilita come abbiamo detto nei capitoli precedenti, perché i fisici delle particelle non la mettono da parte per lavorare su qualche problema ancora aperto, o non si mettono a scrivere libri? In realtà nella teoria rimane molto da fare per capire le proprietà delle soluzioni delle equazioni fondamentali, e tutte le implicazioni e predizioni della teoria stessa; molti fisici delle particelle stanno lavorando in queste direzioni. Ma ci sono anche argomenti molto forti a sostegno della tesi che la teoria sarà estesa. Per la precisione, ci sono quattro solidissimi argomenti fondati su fenomeni osservati e altri tre argomenti fondati su speranze. I primi due argomenti sono strettamente connessi ma indipendenti, il terzo ha qualche legame con essi, mentre il quarto è molto diverso.

Fenomeni non predetti dalla teoria standard

Una nuova scala in natura

C'è un'implicazione notevole della teoria standard, notata per la prima volta alla metà degli anni '70 da Howard Georgi, Helen Quinn e Steven Weinberg, la quale sembra suggerire che essa dovrà essere incorporata in un teoria più generale. Poiché la teoria standard è una teoria matematica, possiamo domandarci come sarebbero le forze debole, elettromagnetica e forte se potessimo fare esperimenti su distanze sempre minori; i collisori sono come microscopi, e quando possono

operare con energie maggiori permettono di scandagliare distanze minori (ossia hanno un migliore potere di risoluzione). Anche se oggi non abbiamo i mezzi tecnici per compiere tali esperimenti, possiamo calcolare le predizioni in proposito della teoria standard. Ne risulta che, a distanze minori, le tre forze sembrano sempre più simili fra loro, e alla distanza di circa 10^{-30} cm sembrano diventare la stessa, ossia « unificarsi ». Almeno qualitativamente, le tre forze oltre alla gravità hanno effetti diversi a distanze maggiori, ma sono forse manifestazioni diverse di una sola forza sottostante, un po' come, più di un secolo fa, ci si rese conto che elettricità e magnetismo sono due manifestazioni diverse di una sola forza.

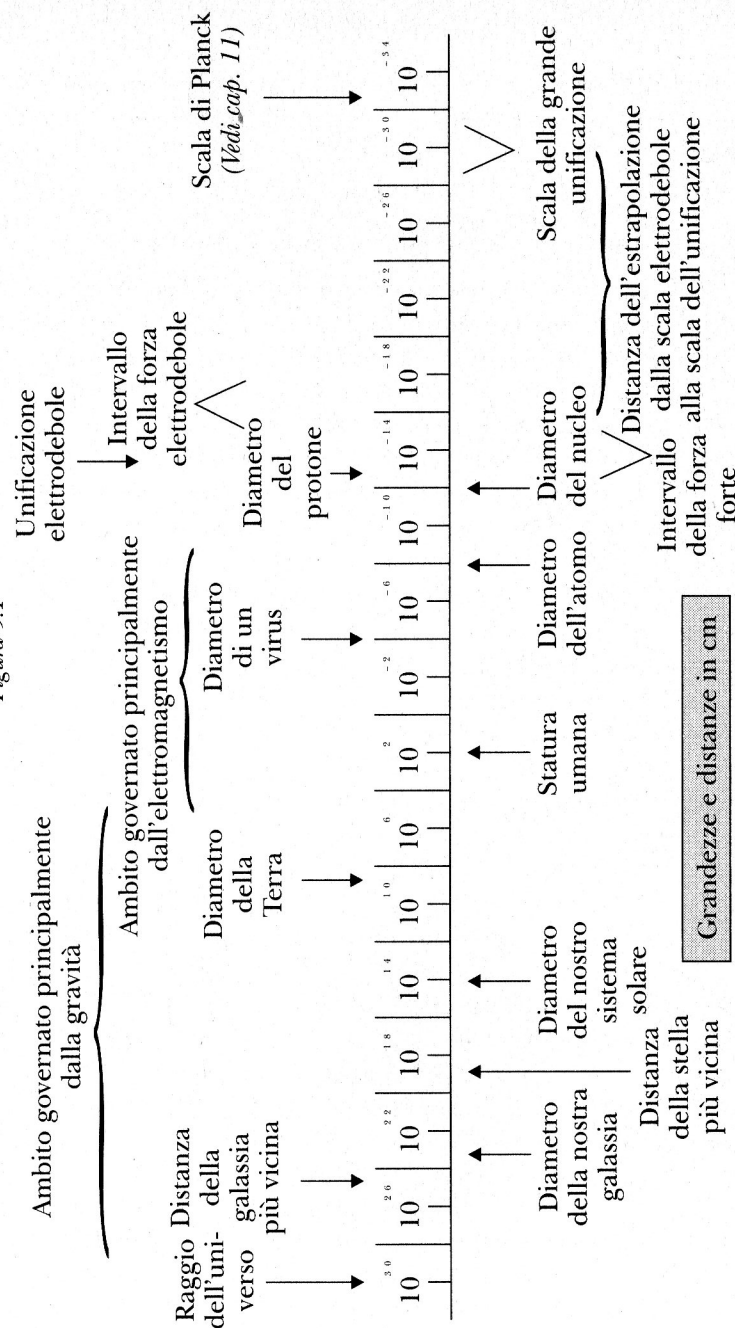
Questo risultato ha potenti implicazioni. Esso non sembrerebbe necessario, nel senso che nulla di ciò che conosciamo della teoria standard richiede quest'unificazione delle forze. Esso dipende da due cose: la prima è il modo in cui la teoria standard ci suggerisce di estrapolare il comportamento della grandezza delle forze a distanze minori; il secondo è costituito dai valori iniziali per l'estrapolazione della grandezza di ogni forza. Questi ultimi vengono misurati in esperimenti, e avrebbero potuto benissimo essere anche molto diversi senza contraddire in alcun modo conosciuto la struttura della teoria standard. Per esempio, dal punto di vista della teoria standard la grandezza della forza elettrodebole è descritta da una quantità detta α_2. Nella teoria standard α_2 è semplicemente qualcosa da misurare. Risulta che $\alpha_2 = 0,033 \pm 0,003$. Se la misura ottenuta fosse stata la metà, o il doppio, di tale valore, l'unificazione semplicemente non avrebbe luogo.

Ovviamente, qualcuno potrebbe sostenere che l'unificazione delle forze fu una coincidenza priva di significato, e che era una cosa possibile, anche se improbabile. Studi dettagliati forniscono però ulteriore sostegno al significato dell'unificazione (come si vedrà nel capitolo seguente). Ciò che essi ci dicono è che in natura c'è una nuova scala per la quale in precedenza non c'era alcuna prova. A quanto sappiamo, la teoria standard sarebbe del tutto coerente e dotata di signi-

ficato anche senza l'esistenza di questa nuova scala. Questa implica che alla distanza di 10^{-30} cm le leggi di natura siano ancora più semplici che alle distanze che conosciamo direttamente da esperimenti (fino a circa 10^{-16} cm).

C'è un'altra implicazione. Le equazioni della teoria standard sono troppo complicate per poter essere risolte esplicitamente per mezzo di qualunque tecnica a noi oggi nota. Per compiere l'estrapolazione a distanze minori si usa un metodo che fornisce una soluzione approssimata. (L'espressione tecnica usata per descrivere questo metodo è « perturbativo ».) La natura avrebbe potuto essere tale che gli assunti usati per giustificare soluzioni approssimate fossero sbagliati. Quando ciò è accaduto in altre aree, il risultato era di solito complicato e difficile da interpretare. Qui otteniamo invece un risultato molto semplice ed elegante: le diverse forze diventano uguali. Questo fatto suggerisce che le approssimazioni siano valide, e che fra le distanze scandagliate in esperimenti al LEP e al Fermilab (circa 10^{-16} cm) e quella in cui le forze sembrano fondersi in una (circa 10^{-30} cm) non ci sia una scala intermedia in cui si verifichino nuovi fenomeni importanti: se ci fossero fenomeni del genere, le approssimazioni non avrebbero funzionato. Questo argomento non è una dimostrazione, ma solo un'indicazione. Ogni volta che si compiono ricerche in un'area non ancora perfettamente definita, si devono cercare indizi e decidere se li si debba o no prendere sul serio.

L'estrapolazione da 10^{-16} cm a 10^{-30} cm può sembrare un passo molto lungo, ma dipende da come lo si osserva. La figura 9.1 mostra le scale di distanza per varie cose che conosciamo: ossia le grandezze di vari oggetti, su una scala in cui ogni trattino sull'asse orizzontale corrisponde a una grandezza dieci volte maggiore o minore di quella adiacente: abbiamo dunque una « scala logaritmica ». Considerata in questo modo, la distanza dalla scala dell'interazione debole alla nuova scala – chiamata di solito la scala della « grande unificazione », o a volte solo la scala dell'« unificazione » – non è molto maggiore delle altre distanze. Questa non è solo una trovata

Figura 9.1

per far apparire le cose più semplici: la teoria standard ci dice che una scala logaritmica è proprio il modo giusto in cui si deve considerare la situazione.

Il calcolo dell'angolo dell'unificazione elettrodebole θ_w

A volte possiamo scoprire se un indizio sia o no significativo mettendolo alla prova e vedendo come reagisce. Se si insiste nel prendere sul serio la nuova scala e nel compiere i calcoli approssimati al meglio possibile oggi, i risultati che si ottengono sono ancor più interessanti. Quando, nel 1990, divennero disponibili misurazioni più precise eseguite dal LEP, fu ripetuta l'estrapolazione a distanze minori; il risultato fu che essa fallisce se si usano solo le formule della teoria standard! In precedenza i dati erano stati troppo imprecisi per poter fornire questo risultato. Si è visto però che un piccolo mutamento nelle formule che incorporano la teoria standard in una particolare teoria estesa (quella « supersimmetrica », che descriveremo nel capitolo seguente) ripristina l'unificazione. Si potrebbero trovare anche altre teorie estese in grado di funzionare, così che non è detto che la teoria supersimmetrica sia proprio quella giusta, ma questo fatto ci dà un forte incoraggiamento a studiarla. In particolare, se si parte da una teoria unificata supersimmetrica, l'angolo θ_w, descritto nel capitolo 4, può ora essere predetto anziché solo misurato, e la predizione concorda con la misurazione con una precisione impressionante, di 1 su 200. Ogni misurazione comporta un margine di incertezza, e un tale margine hanno anche tutte le predizioni teoriche, che dipendono a loro volta da altre quantità misurate. L'esattezza con cui una predizione può essere verificata dipende dall'entità di queste incertezze. Dopo molto lavoro da parte sia di sperimentatori sia di teorici, il margine di errore in θ_w è stato ridotto a questo piccolo livello. Questo accordo pare debba essere considerato un ulteriore indizio del fatto che la teoria standard verrà estesa; in caso contrario, anche questo perfetto accordo sarebbe stato una semplice coincidenza.

Quark e leptoni si presentano in configurazioni identiche

Come abbiamo visto nel capitolo 4, quark e leptoni sembrano essere fatti con lo stesso stampo: l'unica differenza consiste nel fatto che i quark sono portatori di una carica di colore e i leptoni no. La teoria standard non richiede che fra loro ci siano tali somiglianze. Le coincidenze che essi presentano suggeriscono di nuovo che essi siano in qualche modo connessi in una teoria estesa, e che tale teoria prima o poi verrà trovata.

La teoria standard non ha un candidato per la materia oscura

Un risultato sorprendente, dedotto in vario modo da argomenti cosmologici e da dati astrofisici durante gli ultimi due decenni, è che la maggior parte della materia nell'universo non è affatto composta di protoni, neutroni ed elettroni, ma di qualcosa di totalmente diverso. Protoni, neutroni ed elettroni si concentrano sotto l'azione della forza di gravità e formano stelle, che si riuniscono in galassie, osservabili con i nostri strumenti ottici. Vari caratteri dell'universo osservabile, e in particolare i moti delle stelle e delle galassie, implicano che esso contenga una certa quantità di materia. Ma la materia visibile nelle stelle è solo l'1 o il 2 per cento del totale richiesto, e altre argomentazioni ci conducono ad ammettere che la materia che conosciamo potrebbe formare meno del 10 per cento della materia totale. La parte restante della materia dell'universo è « oscura », ossia non forma stelle che possiamo osservare.

Questa è una conclusione notevole e non ancora stabilita al di là di ogni dubbio, ma lentamente, nel corso di un decennio, sono state eliminate scappatoie e possibilità alternative. Se le cose stanno davvero in questi termini, la prossima domanda è: di che cosa è fatta la materia oscura? La natura della materia oscura è ancora più difficile da spiegare della sua esistenza. Sempre nuovi indizi hanno suggerito che la materia oscura sia composta di particelle stabili non ancora

identificate che esisterebbero in gran numero in tutto l'universo.

Se le particelle della materia oscura esistono, possiamo attenderci che siano comprese in una teoria completa insieme ai quark, ai leptoni e ai bosoni. La teoria standard, pur descrivendo il nostro mondo visibile, non ha spazio per le particelle della materia oscura. Per molti fisici, questo è un ulteriore indizio del fatto che la teoria standard sarà estesa.

Benché non ci sia ancora alcun consenso sui particolari, è possibile costruire una teoria con una particella candidata a far parte della materia oscura che soddisfi le richieste. Una tale teoria può essere costruita in effetti nell'ambito stesso della medesima estensione supersimmetrica della teoria standard che permette il calcolo di θ_w descritto in precedenza. Meglio ancora, la candidata a particella della materia oscura della teoria supersimmetrica venne naturalmente dalla teoria stessa, anziché in risposta alle osservazioni astrofisiche di materia oscura.

Una comprensione dei dati e dei meccanismi della teoria standard?

La teoria standard è una descrizione di come operano le leggi della natura. Una volta misurate le masse di quark e leptoni, e le intensità delle forze, i valori di queste quantità possono essere usati nelle equazioni della teoria standard per calcolare in che modo le particelle si comportino negli esperimenti. I fisici delle particelle sperano (questa è la prima speranza) che sia possibile fare di meglio. Noi vogliamo una teoria che predica anche i valori delle masse e le intensità delle forze. La scoperta di una tale teoria ci darebbe quella che nel capitolo 7 abbiamo chiamato una «comprensione dei dati e dei meccanismi».

Benché la maggior parte dei teorici delle particelle creda che una tale comprensione sarà infine conseguita, non esiste alcuna chiara argomentazione scientifica che possa rassicurarci in proposito. Il problema – come quasi tutti ammettono – non sta tanto nel fatto che, comprendendo meglio la teoria esistente, potremmo calcolare i valori delle masse, quanto nel fatto che occorre un nuovo principio, inquadrato in una teoria estesa. Il ruolo dell'esperimento non sta solo nel procurare i valori delle masse, che sono già tutte misurate eccezion fatta per i neutrini, ma nel fornire dati che indichino il cammino verso la nuova teoria.

Una condizione per poter conseguire una comprensione dei dati e dei meccanismi è imparare la fisica basilare del meccanismo di Higgs. Poiché in pratica questo meccanismo è il modo in cui le masse vengono introdotte nelle equazioni, speriamo (questa è la seconda speranza) che la sua base fisica venga compresa; in tal caso avremo un indizio che si suggerirà o ci permetterà di scegliere la nuova teoria in grado di predire i valori delle masse. Per poter fare progressi in questo contesto si dovrà probabilmente scoprire e studiare un bosone di Higgs, o dimostrare che una tale particella non esiste.

Possiamo chiederci più in generale quali dovrebbero essere gli ingredienti di un programma sperimentale corretto. Considerando solo criteri scientifici (e ignorando qualsiasi problema di finanziamento), se facessimo un elenco minimo delle informazioni sulla natura che potrebbero avere il massimo impatto sullo sviluppo della fisica delle particelle, che cosa comprenderebbe tale elenco? La cosa che balza subito all'attenzione è il bisogno di scoprire un bosone di Higgs, o di dimostrare che una tale particella non esiste; questo è un compito per l'acceleratore LEP del CERN e per il Fermilab, se migliorerà la luminosità del suo collisore, e poi per il futuro acceleratore LHC del CERN e per l'NLC. I superpartner che descriveremo nel prossimo capitolo dovrebbero essere trovati o esclusi: il LEP e i collisori del Fermilab, opportunamente potenziati, hanno buone possibilità di chiarire questo problema, e meglio ancora faranno l'LHC e l'NLC. Se si troveranno superpartner, la direzione futura del campo sarà ben stabili-

ta, mentre se essi *non* esistono la maggior parte dei teorici delle particelle sta lavorando nella direzione sbagliata. È molto importante misurare bene la massa e le proprietà del quark *top*, e stabilire se le determinazioni indirette della sua massa concordino con la massa reale. È essenziale determinare la massa dei neutrini, e stabilire se il protone effettivamente decada (e, in tal caso, quali siano i prodotti del suo decadimento). La scoperta di una qualsiasi rara occorrenza di decadimento proibita dalla teoria standard avrebbe un impatto importante sul nostro pensiero. Una migliore comprensione della violazione della simmetria *CP* (vedi l'Appendice C) potrebbe essere molto importante nel determinare come procedere. La scoperta di particelle della materia oscura in esperimenti di laboratorio, o la dimostrazione che esse non esistono, dovrebbe essere fra gli obiettivi più importanti della fisica delle particelle.

È possibile una comprensione del perché delle leggi della natura?

Perché l'universo, e le leggi che ne governano il comportamento, sono così come sono? Perché esistono le quattro forze, e qual è la connessione della gravità alla forza debole, a quella elettromagnetica e a quella forte? Perché le famiglie di quark e di leptoni sono tre, e non di meno o di più? Perché le regole specificate dalla teoria quantistica e dalla relatività ristretta sono quelle che sono?

Prima della formulazione della teoria standard, ragionare su queste domande sarebbe stata un'oziosa speculazione. A cominciare dalla metà degli anni '80, per la prima volta nella storia, questi e altri tipi di domande, come le origini dello spazio e del tempo, sono diventati problemi di ricerca. In passato, ogni volta che un argomento è diventato un problema di ricerca è stato infine risolto, cosicché forse (questa è la terza speranza) sarà così anche questa volta. Ovviamente questi sono tipi nuovi di domande, cosicché la storia potrebbe non essere una buona guida. A volte qualcuno sostiene che l'uomo non riuscirà mai a comprendere questi problemi, ma non è mai stato addotto alcun ragionamento scientifico a sostegno di questa tesi; finora tali ragionamenti ci hanno detto di più sulle persone che li fanno che sugli argomenti in discussione.

Un problema più serio è se il fattore che limiterà la nostra comprensione – se un tale fattore ci sarà – sarà una mancanza di dati sperimentali capaci di indicarci la via da seguire. Senza dati che ci aiutino a decidere fra idee alternative, o che convincano i teorici a prendere sul serio un particolare approccio e a esplorarne le implicazioni, va perduta la connessione con la natura che fornisca il criterio per ciò che è corretto.

Con ogni probabilità gli esperimenti saranno infine possibili e saranno fatti, ma saranno difficili e forniranno informazioni limitate che dovranno essere interpretate con grande attenzione. Le buone teorie suggeriscono esperimenti o fenomeni che non avrebbero potuto essere neppure immaginati prima della loro introduzione, come la predizione delle onde elettromagnetiche fondata sulle equazioni di Maxwell che sarebbe stata confermata venticinque anni dopo da Heinrich Hertz, o la spiegazione da parte di Einstein della precessione del perielio del pianeta Mercurio, o la predizione dell'esistenza di un certo tipo di materia oscura in teorie supersimmetriche (su cui torneremo nel capitolo 10); alcuni altri esempi saranno forniti nel capitolo 11. Se le argomentazioni esposte in precedenza in questo capitolo su una nuova scala in natura e sulla validità dei calcoli approssimati che connettono quantità derivanti da tale scala con cose misurate in esperimenti attuali sono corrette, ciò significa che noi possiamo estrapolare attendibilmente per gran parte della via che ci separa dalle distanze brevissime alle quali dovrebbe applicarsi, secondo le idee attuali, la comprensione del perché. Noi possiamo avere una ragionevole speranza di trovare effetti derivanti dalla scala dell'unificazione rivelabili sperimentalmente. I teorici di tutto il mondo sono attualmente

impegnati a postulare modelli alla scala dell'unificazione e a estrapolarne predizioni per esperimenti in corso; altri considerano dati esistenti e cercano di vedere per estrapolazione che cosa essi implichino per la scala dell'unificazione.

10
La supersimmetria: il prossimo balzo in avanti?

Forse la supersimmetria condurrà all'unificazione, aiuterà a spiegare la fisica di Higgs, renderà ragione della materia oscura (fredda) dell'universo e aiuterà a connettere le interazioni di particelle alla gravità

NEI capitoli 8 e 9 abbiamo introdotto due indizi forti che ci indicano la direzione in cui dovrebbe venire estesa la teoria standard: il primo è il buon funzionamento del meccanismo di Higgs per introdurre le masse nella teoria, cosicché possiamo supporre che esso – o qualcosa di simile – sia una conseguenza di una teoria estesa; il secondo è il fatto che, a una distanza di circa 10^{-30} cm, si ha un'apparente unificazione delle forze. Queste sono le due cose più vicine a prove certe che conosciamo, anche se la loro interpretazione non è ancora chiara.

Che cosa ci guadagniamo se la teoria è supersimmetrica?

L'esistenza di una scala nuova e molto diversa a cui la fisica è più semplice pone condizioni molto forti a qualsiasi teoria la incorpori. In una teoria quantistica si possono fare ragionamenti molto generali (ma purtroppo anche molto tecnici e complicati) a sostegno della tesi che la fisica non dovrebbe esistere a due scale molto separate connesse fra loro dai tipi di approssimazioni che abbiamo descritto nel capitolo precedente, a meno che non vengano soddisfatte ulteriori condizioni. Una separazione delle scale è naturale solo se la teoria ha certe proprietà chiamate simmetrie, tali che diverse quantità si combinino esattamente nel modo giusto per conseguire il risultato desiderato.

Un terzo indizio possibile su come ampliare la teoria stan-

dard è l'esistenza della materia oscura, di cui ci siamo occupati in breve nel capitolo precedente, e un quarto potrebbe essere fornito dalle somiglianze sospette fra quark e leptoni. Inoltre le forze della teoria standard non sono ancora unificate con la gravità, e noi speriamo che la prossima estensione della teoria standard presenti almeno delle connessioni con la gravità che possano aiutarci a capire in che modo correlare la gravità con le forze della teoria.

C'è un altro insieme di possibili indizi forniti da esperimenti, che potremmo designare con l'espressione « Il cane non ha abbaiato », dall'indizio essenziale usato da Sherlock Holmes per risolvere il mistero della scomparsa di *Silver Blaze*. (« È chiaro », dice Holmes, « che il visitatore di mezzanotte era una persona che il cane conosceva bene. ») Similmente, molti esperimenti sono stati eseguiti con la speranza di trovare un risultato che mostrasse la presenza di una fisica non spiegata dalla teoria standard, ma hanno finito col portare altre conferme alla teoria stessa. La maggior parte delle estensioni della teoria standard conducono a varie predizioni di osservazioni che differiscono da quelle della teoria stessa. La richiesta che un'estensione soddisfacente della teoria fornisca risultati quasi identici a quelli della teoria per certe misurazioni, ma non per altre, è un vincolo potente.

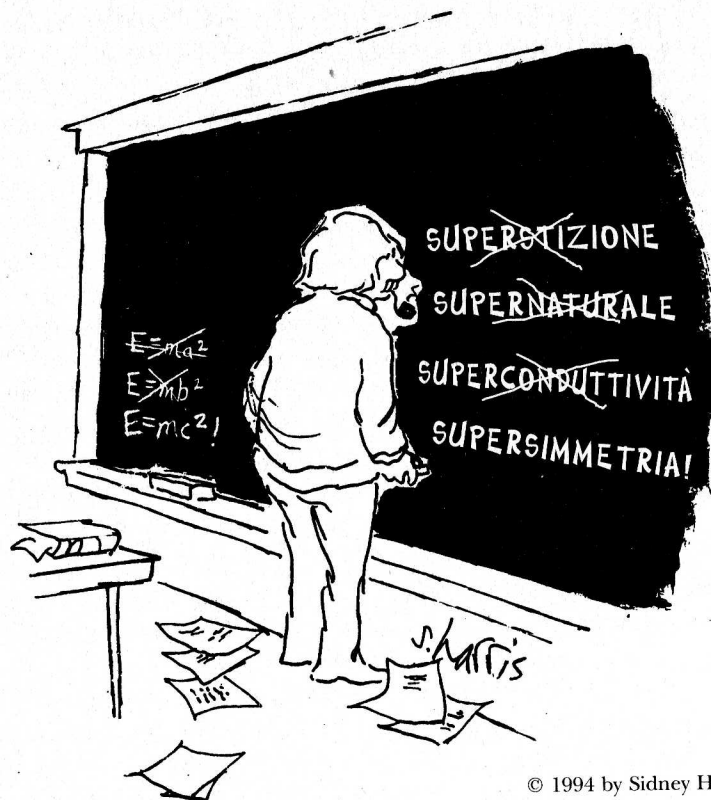
La ragione per cui parecchi ricercatori si attendono molto dall'estensione della teoria standard nota come teoria standard supersimmetrica è che essa soddisfa tutte queste richieste: incorpora la fisica di Higgs; concilia le due scale molto separate in un modo coerente; può unificare quark e leptoni e le forze della teoria standard; fornisce una particella candidata per la materia oscura; ha una connessione con la gravità; e non ha « abbaiato » quando non avrebbe dovuto.

Tuttavia, fino a quando scoperte sperimentali esplicite non confermeranno più direttamente le predizioni, noi siamo ben lontani dal sapere se la natura sia effettivamente supersimmetrica. Più avanti, nel corso di questo capitolo, descriverò alcune fra le scoperte che potrebbero verificarsi. Forse è opportuna anche un'avvertenza: nel caso che il lettore non lo

avesse già sospettato da sé, io sono fra i fautori della teoria supersimmetrica, e la maggior parte delle mie ricerche è collegata ad essa. Non tutti i fisici riconoscerebbero oggi alla supersimmetria una posizione così importante.

Che cosa rende supersimmetrica una teoria?

Avendo in mente i risultati già conseguiti, vediamo che cosa renda supersimmetrica una teoria, e consideriamo alcune implicazioni della supersimmetria. Verso la fine del capitolo 4 abbiamo descritto la proprietà delle particelle chiamata spin. Tutte le particelle si suddividono in relazione allo spin in due categorie: i fermioni (il cui spin è un multiplo semintero di un'unità base) e i bosoni (il cui spin è un multiplo intero di tale unità); in pratica, per la fisica delle particelle, i fermioni hanno spin 1/2 e i bosoni hanno spin 0 o 1. La differenza può sembrare piccola, ma ha profonde implicazioni per il loro comportamento in un mondo in cui le regole sono fissate da una teoria quantistica. Una fra le molte differenze che ne conseguono è che due bosoni possono occupare esattamente lo stesso posto nello stesso tempo, mentre due fermioni non possono (è il principio di esclusione di Pauli). Se tutto fosse fatto di bosoni, tavoli e muri non sarebbero così solidi. (Questi sono effetti affascinanti, ma il loro esame ci condurrebbe troppo lontano dal nostro argomento principale, cosicché non ce ne occuperemo oltre.)

Nella teoria standard le particelle materiali (gli elettroni e gli altri leptoni, e i quark) sono fermioni, mentre i quanti che trasmettono le interazioni sono bosoni. L'idea fondamentale di una supersimmetria è quella di ipotizzare che la legge fondamentale, o le leggi fondamentali, della natura siano effettivamente simmetriche fra bosoni e fermioni. Ogni bosone della teoria standard ha un « superpartner » fermione e viceversa. I superpartner sono identici sotto ogni aspetto (hanno la stessa massa, la stessa carica elettrica, lo stesso colore), tranne che per lo spin. Lo spin differisce sempre

di 1/2. Il superpartner del fotone ha spin 1/2, mentre quello dell'elettrone ha spin 0.

Nel caso di una teoria matematica non ci si può limitare a dire: «Aggiungiamo alla teoria una categoria di particelle», ma è necessario estendere la struttura matematica della teoria standard in modo da includervi tutti i superpartner e tutte le relazioni fra loro implicate dalla nuova simmetria. Durante la costruzione della teoria ampliata avrebbe potuto facilmente emergere un'incoerenza. Nel caso della supersimmetria, invece, tutto funzionò perfettamente: all'inizio degli anni '70 vari teorici riuscirono a costruire una teoria relativistico-quantistica dei campi supersimmetrica.

Poiché, diversamente dalle particelle ordinarie, i superpartner non sono stati osservati, la completa supersimmetria dovrebbe in qualche modo essere rotta, anche se rimane valida per le leggi fondamentali. Se ci fosse un partner dell'elettrone con la sua stessa massa, si combinerebbe con nuclei a formare atomi, e noi ne saremmo a conoscenza. Se la natura è supersimmetrica, per spiegare perché nessun impianto esistente abbia avuto finora proiettili dotati di energia sufficiente a produrre i superpartner, dobbiamo supporre che essi siano più pesanti delle particelle che conosciamo. Potrebbe valere qualcosa di simile all'esempio ipersemplificato del capitolo 7, dove l'equazione per descrivere la massa di una particella (chiamiamola m) e quella del suo superpartner (chiamiamola M) è (in un esempio semplice irrealistico) $mM = 16$. L'equazione è simmetrica: essa non muta se si interscambiano m e M. La soluzione potrebbe essere, per esempio, $m = M = 4$ oppure $m = 2$ e $M = 8$. A quanto pare la natura ha scelto la seconda possibilità, anche se non sappiamo perché. Dato che la massa è l'aspetto meno compreso delle teorie attuali, non ci sentiamo a disagio per il fatto che la supersimmetria sia rotta solo per le masse. Tutti gli altri aspetti della teoria rimangono simmetrici, cosicché è possibile calcolare come interagirebbero i superpartner, quanti ne sarebbero prodotti in un nuovo collisore, come decadrebbero e via dicendo.

La teoria della supersimmetria ci dice che a tutte le particelle possono essere associati numeri addizionali, in modo tale che a particelle ordinarie siano associati numeri positivi e a superpartner numeri negativi. La teoria dice anche che il prodotto di tutti i numeri delle particelle in un processo non può cambiare segno. Perciò, se un processo comincia con particelle ordinarie (così che il prodotto è positivo), deve terminare con un numero pari di superpartner prodotti, così che il prodotto dei numeri finali continui a essere positivo. Similmente, quando un superpartner decade, il numero iniziale è negativo, cosicché le particelle finali devono avere un numero dispari di superpartner (di solito uno). Questa cate-

na termina col superpartner più leggero, che dev'essere una particella stabile; essa non potrebbe infatti decadere ulteriormente formando tutte particelle normali, dato che il prodotto dei loro numeri sarebbe positivo.

Partendo da quest'analisi perveniamo a una predizione notevole sulla supersimmetria: che dovrebbe esistere una nuova particella stabile in aggiunta all'elettrone, al quark *up* e ai neutrini. Studi accurati legittimano l'ipotesi che dovrebbe trattarsi di una particella priva di colore e di carica elettrica. Non avendo né l'uno né l'altra non può interagire a formare adroni, nuclei o atomi, cosicché non può produrre agglomerati di materia densa in grado di formare stelle luminose. Essa dovrebbe comportarsi come «materia oscura», e in effetti ha tutte le proprietà di questa misteriosa forma della materia richiesta dagli astrofisici e dai cosmologi. La materia oscura supersimmetrica non fu inventata per fare un favore agli astrofisici, anche se ben si concilia con le loro esigenze. Essa è piuttosto una conseguenza naturale della teoria standard supersimmetrica, di cui ci si rese conto per la prima volta all'inizio degli anni '80.

In una teoria supersimmetrica il problema delle scale molto separate descritto nel capitolo precedente viene risolto automaticamente in un modo tecnico. Le regole della teoria quantistica richiedono che bosoni e fermioni contribuiscano con segno opposto a qualsiasi quantità svolga un ruolo nella connessione delle due scale, cosicché, se ogni bosone si presenta insieme a un fermione, il loro contributo netto dà zero e il problema scompare, purché le masse dei superpartner non siano molto più grandi delle masse delle particelle. La teoria supersimmetrica da sola non predice che dovrebbero esistere due scale nettamente separate, ma permette di costruire una teoria significante nel caso che esistano (come effettivamente pare che sia).

Il modo in cui la teoria supersimmetrica si occupa della fisica di Higgs è sottile. Essa rappresenta un grande miglioramento rispetto alla teoria standard, ma non è una soluzione completa. I campi di Higgs, e quindi i bosoni di Higgs, devono essere inclusi in essa esplicitamente, come pure tutti i campi dei quark e dei leptoni. A partire da quel punto, però, si può derivare tutta la fisica di Higgs necessaria, anziché richiedere speciali assunti come nella teoria standard. Si presume che la teoria standard supersimmetrica abbia la sua forma fondamentale alla scala di distanze minima. Per dedurre come la teoria si comporti alle distanze scandagliate negli esperimenti attuali e a distanze maggiori si usa poi la tecnica dell'estrapolazione descritta nel capitolo precedente. Quel che accade è notevole ed elegante. Le condizioni necessarie per il funzionamento del meccanismo di Higgs, così che si possa assegnare una massa ai bosoni *W* e *Z* e ai quark e ai leptoni senza togliere senso alla teoria, emergono dalle equazioni della teoria supersimmetrica. Come abbiamo visto nel capitolo 8, lo stato di minima energia diventa lo stato in cui il campo di Higgs ha un valore costante diverso da zero, anziché svanire come tutti gli altri. Il meccanismo di Higgs è derivato.

Questi risultati della fisica di Higgs furono ottenuti all'inizio degli anni '80, e dipesero da una condizione. Perché la teoria supersimmetrica potesse prevedere il meccanismo di Higgs, era necessario che il quark *top* fosse molto pesante, più pesante del bosone *W* se il meccanismo di Higgs doveva funzionare indipendentemente da altri parametri della teoria. A quell'epoca il quark più pesante noto era il quark *bottom*, che pesa press'a poco un ventesimo del bosone *Z*, ed era difficile credere che il quark *top* potesse essere così pesante. Oggi sappiamo, dai dati raccolti dal LEP e dal Fermilab, che esso è effettivamente alquanto pesante, proprio come richiede la teoria supersimmetrica. La fisica di Higgs, considerata dal punto di vista della teoria standard, è oscura e misteriosa. Molto è stato scritto sull'argomento, e parecchi fisici provano in proposito un senso di disagio. Se la versione supersimmetrica fosse apparsa per prima, io penso che la fisica di Higgs sarebbe stata accettata come un risultato attraente e naturale, accompagnato da ben poco mistero.

La scoperta della supersimmetria

Nella teoria standard supersimmetrica non c'è alternativa all'esistenza dei bosoni di Higgs. Se non si troveranno, sapremo che l'intera teoria è sbagliata. Oggi non comprendiamo ancora abbastanza bene la teoria supersimmetrica per poter predire sulla sua base la massa dei bosoni di Higgs, ma la conosciamo abbastanza bene per poter dimostrare che c'è un limite superiore a tale massa e, inoltre, per poter calcolare il valore numerico di tale limite stesso. Quest'ultimo punto è importante: infatti, sarebbe potuto accadere (cosa che non è avvenuta) che si potesse fissare un limite, ma che il suo valore dipendesse da altre quantità i cui valori non fossero noti, nel qual caso il limite non avrebbe avuto alcun interesse pratico. Ci si attende che la massa del bosone di Higgs sia da poco superiore a meno del doppio della massa del bosone *W*. Questo intervallo di valori potrebbe essere esplorato dal LEP o dal collisore del Fermilab, previo un appropriato potenziamento di tali acceleratori, e dal progettato nuovo acceleratore di adroni del CERN, l'LHC (se verrà dotato di rivelatori molto buoni), come pure dal proposto nuovo collisore lineare di elettroni, chiamato NLC, che si ispirerà all'attuale SLC dello SLAC.

Passiamo ora a considerare in breve i superpartner, le nuove particelle associate a quelle che conosciamo. Benché le regole usate nell'assegnazione dei nomi in questo campo siano piuttosto semplici, i nomi stessi risultano alquanto bizzarri. I partner dei bosoni hanno ricevuto il suffisso -ino (fotino, zino, wino, gluino, higgsino), pur non essendo affatto così piccoli o leggeri come suggerirebbe il suffisso. I partner dei fermioni hanno invece ricevuto il prefisso s- (selettrone, smuone, sleptone, squark, stop ecc.). La supersimmetria ha la propria sterminologia.

I superpartner non dovrebbero essere già stati trovati? È vero, come suggeriscono alcuni, che la loro mancata scoperta getti dubbi sulla validità della teoria? Oppure non sono ancora stati trovati perché sono troppo pesanti? Come nel caso della teoria standard ci mancano ancora i princìpi per predire con certezza le masse. Nel caso supersimmetrico ci sono però vincoli che ci aiutano a rispondere a queste domande. L'unico modo noto per studiare il problema è quello di costruire modelli che soddisfino tutti i vincoli teorici e sperimentali, e di chiedersi quali masse vengano ad avere in essi i superpartner. L'implicazione della costruzione di tali modelli è che, se fossimo stati fortunati, avremmo già potuto scoprire superpartner, ma l'ambito naturale di variabilità delle loro masse si trova nella regione che sarà parzialmente studiata dal LEP e al Fermilab a cominciare dalla metà degli anni '90, o forse anche oltre tale regione. L'intervallo di variabilità delle masse dovrebbe comunque trovarsi quasi per intero nella regione che sarà coperta dall'LHC del CERN, e gran parte di esso potrebbe essere coperto dall'NLC se sarà costruito. Vincoli importanti alle masse sono che, se le masse degli squark, sleptoni e wini saranno troppo piccole o troppo grandi, la quantità predetta della materia oscura non sarà giusta, non sarà giusto il modo di operare del meccanismo di Higgs, o non si avrà l'unificazione delle forze a brevi distanze.

Il primo superpartner sarà forse trovato dal LEP o al Fermilab nei prossimi anni. Ma quand'anche ciò accadesse, vi si potranno studiare solo uno o pochi superpartner, non avendo tali impianti energia o luminosità sufficienti per produrre e scoprire la maggior parte dei partner supersimmetrici. Per sistemare compiutamente la struttura della teoria, sarà essenziale misurare le proprietà di quasi tutti i superpartner. Ciò dovrebbe infine essere possibile combinando le informazioni che saranno nel frattempo raccolte dall'LHC e dall'NLC. I superpartner dovrebbero lasciare firme uniche ben definite nei rivelatori, così che, se si saranno prodotti, sarà possibile scoprirli e studiarli. Rivelarli, comunque, non sarà semplice, in quanto a volte particelle comuni possono imitare le firme di partner supersimmetrici, ma si può sempre imparare a distinguere i superpartner dalle particelle ordinarie.

Se si scoprirà la supersimmetria, se ne potrebbero ricavare importanti vantaggi. Se il metodo di estrapolazione approssi-

mata usato per mettere in relazione le scale di distanze scandagliate negli esperimenti attuali e le distanze molto minori contemplate dalla teoria standard funzionerà così bene come sembra, ciò significherà essenzialmente la possibilità di «compiere esperimenti» su distanze di 10^{-30} cm, anche se non siamo in grado di costruire un'apparecchiatura reale per farlo. Potremo formulare la teoria alla scala di 10^{-30} cm e derivarne poi col calcolo le predizioni per la scala di 10^{-16} cm e sottoporle a prova. Oppure possiamo compiere misurazioni a 10^{-16} cm e poi estrapolare i dati così ottenuti alla forma della teoria implicata a 10^{-30} cm. Nel capitolo seguente considereremo alcune possibili teorie ultime e vedremo che si può sostenere che una scala di distanze di 10^{-33} cm potrebbe essere speciale in vista della costruzione di una teoria fondamentale. Questa scala sembra impossibilmente lontana da 10^{-16} cm, ma non è poi così lontana da 10^{-30} cm (vedi la figura 9.1 a p. 149).

Benché le teorie supersimmetriche facciano un importante passo avanti verso il miglioramento della comprensione, compiendo le prime irruzioni verso la comprensione dei dati e dei meccanismi, molto rimane ancora da fare. A quanto possiamo vedere, esse non aiutano a risolvere il «problema delle famiglie»: perché ci sono tre famiglie, e non solo una, né più di tre? Non si comprende in che modo si rompa la supersimmetria così che i superpartner non abbiano le stesse masse dei loro partner. L'estensione supersimmetrica della teoria standard non è l'ultimo stadio nel suo ampliamento, ma forse ne è una parte. Come al solito in fisica, il progresso sarà fatto probabilmente un passo per volta.

11

Quanta unificazione? C'è un limite alla comprensione?

L'attuale ricerca sperimentale e teorica verso una maggiore unificazione è l'attività principale di molti fisici delle particelle. Benché l'unificazione possa avvenire a energie o distanze che noi non siamo in grado di scandagliare direttamente, possono esserci molti modi per sottoporre a test le idee sull'unificazione, e persino per verificare idee su promettenti «teorie di tutto» fondate sulle superstringhe

L'UNIFICAZIONE fornisce una prospettiva preziosa per considerare sia il passato sia il futuro della scienza, e in particolare della fisica. Recentemente, come abbiamo visto nel capitolo 4, abbiamo imparato che le interazioni debole ed elettromagnetica sono unificate. Esse ci sembrano diverse, ma ciò dipende dal contesto in cui le osserviamo. In quale altra unificazione possiamo sperare per il futuro?

La grande unificazione

Come abbiamo visto nei precedenti due capitoli, ci sono buone indicazioni del fatto che a distanze molto piccole o (cosa equivalente) a energie molto elevate le forze elettromagnetica, debole e forte diventano effettivamente la stessa forza. Questa unificazione delle tre forze è stata chiamata una grande unificazione, per distinguerla dalla semplice unificazione delle forze debole ed elettromagnetica. Benché il nome sia un po' enfatico, questa è la terminologia standard nella fisica delle particelle, cosicché lo userò, anche se con le iniziali minuscole contro l'uso delle maiuscole adottato da alcuni autori. Nei capitoli 9 e 10 abbiamo visto anche che, perché una tale grande teoria unificata sia coerente, occorre

introdurre qualche nuovo elemento, allo scopo di evitare che le due scale molto separate collassino in una, e la supersimmetria serve ottimamente allo scopo. Una grande teoria unificata e una teoria supersimmetrica non sono approcci alternativi; anzi, una grande teoria unificata che usi il meccanismo di Higgs dev'essere anche una teoria supersimmetrica. È quindi certamente giustificata la speranza che nel futuro prevedibile emerga una grande teoria unificata supersimmetrica. Come in ogni precedente unificazione, la nostra comprensione della natura sarà molto migliorata da una teoria del genere, anche se rimarrebbero problemi non ancora risolti, come l'origine delle famiglie, l'origine della rottura della supersimmetria, le connessioni con la gravità e via dicendo. Se mai si troverà una grande teoria unificata confortata dagli esperimenti, sarà forse possibile risolvere qualche problema finora insoluto, nello stesso modo in cui l'unificazione a opera di Maxwell dell'elettricità e del magnetismo spiegò anche che cos'è la luce.

A volte qualcuno sostiene che ci sono troppe particelle (leptoni più quark di colori diversi) perché possano essere tutte fondamentali, e la supersimmetria ne raddoppia addirittura il numero. Se però vengono unificate, non dovremmo pensarle come particelle diverse. Non consideriamo infatti particelle diverse gli elettroni con lo spin diversamente orientato, anche se hanno interazioni differenti. Similmente, dovremmo considerare un quark su come un solo quark anche se può presentarsi in tre stati di colore diversi, e dovremmo pensare gli elettroni e i loro neutrini come membri diversi di un doppietto. Se quark e leptoni sono effettivamente unificati c'è un oggetto fondamentale – chiamiamolo « quartone » – che assomiglia a un quark o a un leptone a seconda del punto di vista da cui lo si osserva. C'è quindi un solo quartone per la famiglia 1, il quale, a seconda del punto d'osservazione, può apparire un quark su rosso o un elettrone o un quark giù blu. C'è poi un altro quartone per la famiglia 2, e un terzo per la famiglia 3: finora non abbiamo idea di come unificare le famiglie. Neppure le antiparticelle dovrebbero essere considerate particelle separate, poiché particelle e antiparticelle devono sempre esistere insieme. Analogamente, se la supersimmetria è davvero una simmetria della natura, i superpartner non dovrebbero essere contati come particelle separate: anch'essi sono solo un modo diverso di considerare i « superquartoni » di base.

Si possono sottoporre a esperimento le grandi teorie unificate?

La grande unificazione delle forze ha luogo a una scala di distanze di circa 10^{-30} cm. Per chiarire che cosa ciò significhi, supponiamo che i collisori siano effettivamente microscopi. In tal caso, quando ci concentriamo sull'osservazione di oggetti del diametro di circa 10^{-14} cm, possiamo vedere chiare differenze fra gli effetti della forza forte, elettromagnetica e debole. Se ci concentriamo su un ordine di grandezza di oltre 100 volte minore, al di sotto di 10^{-16}, non possiamo più dire che la forza debole e quella elettromagnetica si separino così bene: esse cominciano a unificarsi. A una scala molto minore, fino a 10^{-30}, non possiamo più distinguere alcuna di queste forze da un'altra; ha avuto luogo la grande unificazione. Purtroppo nessun acceleratore reale potrebbe mai scandagliare distanze così piccole.

Questo fatto ha condotto alcuni a temere, o addirittura a sostenere, che le grandi teorie unificate non potranno mai essere verificate sperimentalmente. Benché non tutti i tipi di grande teoria unificata possano essere completamente verificabili, il tipo particolare descritto sopra lo è sicuramente, per due tipi di ragioni. In primo luogo, il metodo di estrapolazione quantistica descritto nel capitolo 9 significa che le predizioni possono essere fatte per le brevi distanze in cui vale la piena unificazione, dopo di che possono essere calcolate per distanze maggiori. Abbiamo visto in precedenza un esempio di questo modo di procedere nel modo di calcolare l'angolo dell'unificazione elettrodebole θ_w: il valore predetto di quest'angolo alle brevi distanze è di 37,76°; l'estrapolazio-

ne a distanze che possono essere scandagliate dall'esperimento dà 28,8° e questo valore è esattamente quello misurato sperimentalmente. Anche le masse dei superpartner (supponendo che esistano) ci forniscono un gran numero di esempi: ci sono circa trentadue masse osservabili che possono essere predette in termini anche di soli quattro parametri, cosicché, se tutti i superpartner sono abbastanza leggeri da poter essere infine rivelati dall'LHC e dall'NLC, si potranno fare con gli acceleratori ventotto esperimenti. Se alcuni di questi superpartner sono troppo pesanti per poter essere scoperti con questi collisori, forse potremo ancora apprendere con altri metodi la maggior parte di ciò che abbiamo bisogno di sapere.

In secondo luogo, ci sono vari fenomeni predetti dalle grandi teorie unificate. In assenza di una teoria nessuno avrebbe saputo come interpretarli se fossero stati osservati, ma all'interno di una tale teoria si possono considerare test importanti. Uno di tali test si propone di studiare come decade il protone (gli esperimenti sono stati descritti nel capitolo 5), se effettivamente questa particella decade. Qualsiasi teoria che metta in relazione quark e leptoni conterrà la possibilità di transizioni dei primi nei secondi. Quark e leptoni verranno allora a essere concepiti come forme diverse di un unico oggetto-base, ossia come quartoni. In alcune forme di teoria, ciò farà del protone una particella instabile. Il decadimento del protone, se è un fenomeno reale, e la sua rapidità, ci forniranno informazioni importanti. È inoltre molto importante sapere quali saranno i prodotti di tale decadimento. Per esempio, in una grande teoria unificata fondata sulla teoria standard il decadimento dominante dovrebbe essere la conversione di un protone in un pione più un positrone, mentre in una fondata su una teoria standard supersimmetrica, il decadimento dominante dovrebbe essere la trasformazione in un kaone più un neutrino (nel decadimento di un protone dovrebbe apparire qualche adrone perché i quark devono comparire come componenti di adroni e non separatamente). Ci sono quindi chiare possibilità di distingue-

« Vede, Gershon, se la particella è troppo piccola e di vita troppo breve per poter essere rivelata, non possiamo certo credere sulla parola che lei l'abbia scoperta! »

re sperimentalmente una grande teoria unificata da un'altra.

Un altro modo importante e diretto per ottenere informazioni sperimentali sulla fisica alla scala dell'unificazione ci è offerto dalle masse dei neutrini. Nella teoria standard i neutrini sono privi di massa, ma di solito non è così nelle grandi teorie unificate. I valori delle masse dei neutrini che infine si troveranno, ci aiuteranno a capire come ampliare la teoria standard in una grande teoria unificata. Ogni forma di grande teoria unificata predirà particolari valori per le masse dei

neutrini. In linea teorica al sistema dei neutrini sono associate nove osservabili, cosicché infine verremo a disporre di una grande quantità d'informazione, anche se non è affatto garantito che in pratica le si potrà misurare tutt'e nove. Osservazioni simili valgono per le masse e altre proprietà dei sistemi dei quark e dei leptoni dotati di carica.

Possono esistere anche altri esperimenti, a seconda della forma che la teoria assume. La grande teoria unificata ha ripercussioni sull'asimmetria barionica dell'universo (capitolo 12) e su vari altri aspetti della cosmologia. E infine, com'è sempre accaduto in passato, una volta che la teoria sia stata scritta e presa sul serio ed esplorata dai teorici, è probabile che saltino fuori nuove predizioni e connessioni con altre parti della fisica che possono fornire altri test. Un esempio ci è fornito dalla predizione di Einstein, fondata sulla sua teoria della relatività generale, che la luce risente della forza gravitazionale; così durante un'eclisse di Sole si è potuto osservare che la luce di stelle lontane, passando accanto al Sole, anziché propagarsi in linea retta segue una traiettoria incurvata verso il Sole stesso. Un altro esempio ci è fornito dall'abbondanza cosmica dell'elio e dalla quantità di fotoni rimasti dopo l'espansione iniziale dell'universo (vedi il capitolo seguente): questi due fra i principali test dell'origine dell'universo nel big bang non avrebbero potuto essere previsti prima dello sviluppo della teoria.

La teoria primaria

Nel 1984 emerse un approccio nuovo e ambizioso alla comprensione del mondo naturale. Persino una grande unificazione è solo un passo in una progressione naturale, una prosecuzione dello stesso programma di ricerca che è in corso da almeno tre secoli. Il nuovo approccio degli ultimi anni continua quello tradizionale nel senso che l'unificazione delle altre forze con la gravità è uno dei suoi obiettivi, ma va oltre. I fautori del nuovo approccio sperano di spiegare

perché ci sono quark e leptoni e non qualche altra particella e di mostrare come abbiano origine spazio e tempo, come pure perché ci siano tre dimensioni dello spazio. Essi sperano che la nuova teoria non abbia quantità indeterminate, siano esse masse, forze o altri numeri o costanti. Nel linguaggio del capitolo 7, l'obiettivo della nuova teoria è una comprensione del perché. La scoperta di una tale teoria significherà che la ricerca delle leggi sottostanti della natura è terminata.

Molti fra coloro che lavorano in questo settore credono che la teoria sia stata effettivamente formulata ma che nessuno abbia ancora accertato se essa descriva o no il nostro universo. La teoria fornisce sì delle equazioni, ma la difficoltà consiste nel vedere se il nostro universo sia una soluzione di tali equazioni. Quand'anche fossero state formulate le equazioni giuste, la loro risoluzione richiede molti stadi, fra cui quello di imparare come sono definiti in essa lo spazio e il tempo. Peggio ancora, di norma le equazioni fondamentali presentano un alto livello di simmetria fra le particelle elementari, cosa che non vale per le soluzioni. È questo il fenomeno della cosiddetta «rottura spontanea della simmetria», di cui ci siamo occupati in breve nei capitoli 7 e 8. Il lettore ricorderà forse l'esempio (che abbiamo visto nel capitolo 7) dell'equazione che trattava l'elettrone, il muone e il tauone simmetricamente, ma che aveva soluzioni che davano loro proprietà diverse. L'obiettivo della ricerca di vari teorici attuali è quello di accertare se ci sia una soluzione che descriva il nostro universo.

Le teorie ambiziose – il plurale è forse appropriato fino a quando non sarà stata scelta una teoria – sono spesso chiamate da alcuni fisici, e più spesso anche da giornalisti e autori di libri, la «teoria di tutto». Il nome, in un certo senso, è appropriato perché una tale teoria spiegherebbe la struttura sottostante su cui sono costruiti tutti i livelli superiori. In un altro senso, invece, non è azzeccato perché essa non spiega cose importanti per noi, come per esempio quando e dove ci saranno terremoti, o la sensazione che ci dà l'ascolto della

musica di Bach. Io la chiamerò, in questo libro, la « teoria primaria ».

In tutto il libro ho avuto cura di dire che quark e leptoni sono puntiformi, anziché dire che sono « punti ». Le teorie ambiziose a cui ho accennato si fondano su oggetti chiamati « superstringhe ». Queste rappresentano i componenti fondamentali (quark e leptoni) nella forma di « stringhe » anziché di punti, ma questa distinzione si manifesterebbe solo a distanze di circa 10^{-32} o 10^{-33} cm, molto minori di quelle scandagliabili da qualsiasi acceleratore, e da 100 a 1000 volte minori di quelle a cui sembra verificarsi l'unificazione delle forze. Di nuovo, ciò ha indotto alcuni a sostenere che la teoria non può essere verificata, e che i fisici teorici stanno abbandonando la scienza per la filosofia o per il misticismo.

La teoria primaria può essere sottoposta a test?

La critica accennata sopra non è giustificata. In precedenza ho spiegato che, dagli anni '70 a oggi, la teoria ha preceduto l'esperimento, e che sarà ancora così nel futuro prevedibile. Nella ricerca della teoria primaria la situazione si è però rovesciata. In un certo senso l'esperimento è già nettamente in anticipo sulla teoria. Benché io mi attenda che, non appena sarà stata sviluppata una teoria in grado di aspirare al ruolo di teoria primaria, essa faccia predizioni nuove e inattese fornendo la possibilità di nuovi esperimenti, ci sono già molti test che essa deve superare. Essa deve richiedere l'esistenza di quark e leptoni, ma non di particelle di massa simile che abbiano i caratteri combinati dei quark e dei leptoni, giacché particelle di questo tipo non vengono osservate. Essa deve spiegare perché viviamo in tre dimensioni dello spazio. Deve spiegare che cosa sono spin, carica elettrica e carica di colore e perché alcune particelle li abbiano. Deve predire le masse di tutt'e dodici i quark e leptoni, e spiegare perché si presentino in tre famiglie. Deve prevedere varie proprietà

osservabili dell'universo: la sua energia totale (in accordo con zero), il suo momento angolare totale (in accordo con zero) ecc. Qualsiasi teoria che sia in grado di spiegare e predire queste cose sarà chiaramente quella che è stata cercata fin dall'inizio, e la sua accettazione come tale sarà ben fondata, nei sensi tradizionali della fisica.

Per renderci conto che questi sono effettivamente test sperimentali, dobbiamo capire che cosa significhino i verbi « spiegare » e « predire ». In che modo la teoria primaria può « predire » l'esistenza di tre dimensioni spaziali se questa è una cosa di cui siamo già a conoscenza? Ovvero, come può una grande teoria unificata supersimmetrica predire che l'angolo dell'unificazione elettrodebole θ_w è uguale a 28,8° se questa misura era già stata ottenuta sperimentalmente prima della scoperta di una tale teoria? La ragione va vista nel fatto che, una volta scritta la teoria, il numero delle dimensioni spaziali e i valori di molte osservabili, fra cui appunto θ_w, risultano determinati in modo unico per la teoria stessa. In generale ci sono tre possibilità: una teoria può determinare in modo unico un valore per qualcosa che è già stato misurato, come θ_w, e ottenerlo in modo corretto, nel qual caso è appropriato dire che la teoria lo predice. Oppure può determinare una quantità ottenendo però un valore in disaccordo con l'osservazione, nel qual caso la teoria risulta sbagliata. Oppure può permettere per una quantità un intervallo di valori, dipendenti dai valori che assumeranno altre quantità (non del tutto note). Se il valore misurato risulterà compreso in tale intervallo, non si potrà dire che la teoria lo ha predetto, bensì che è in accordo con la misurazione, ovvero che « potrebbe spiegarla ». Ci troviamo in una situazione simile nel caso del verbo « spiegare ». Per esempio, è appropriato dire che le leggi di Newton spiegarono le leggi dei moti planetari di Keplero perché, una volta scritte le leggi di Newton, diventava possibile dedurne in modo unico le leggi di Keplero.

Come ho detto qualche paragrafo fa, ci si attende che la natura a stringa piuttosto che puntiforme delle particelle

«Purtroppo non abbiamo la tecnologia per realizzarlo»

appaia solo quando esse siano scandagliate a distanze dell'ordine di 10^{-32} o 10^{-33} cm (se mai sia destinata ad apparire tale). Ci sono tre indizi del fatto che questa dovrebbe essere la scala delle distanze appropriata per la teoria primaria. Innanzitutto, ci attendiamo che questa teoria unifichi la gravità con tutte le altre forze. Quando si estrapolano le intensità delle forze col metodo descritto nel capitolo 9, esse diventano effettivamente tutte simili (compresa la gravità) a una

scala di distanze di circa 10^{-33} cm. In altri termini, se potessimo osservare le interazioni che avvengono a tale ordine di grandezza, troveremmo gli effetti della gravità grandi quanto quelli delle altre forze (che già erano diventati simili fra loro a circa 10^{-30} cm). In secondo luogo, non è ancora stata formulata una teoria quantistica della gravità. Ci si può chiedere se l'esistenza di una tale teoria abbia o no importanza. La risposta è che i risultati della gravità einsteiniana non dovrebbero avere bisogno di modificazioni man mano che i sistemi diventano sempre più piccoli, fino a raggiungere la scala di 10^{-33} cm o ancor meno. In terzo luogo, se ci chiediamo quale sia una distanza naturale per formulare le leggi fondamentali della natura, non prestando alcuna particolare attenzione alla presenza delle persone o di strutture intermedie come gli atomi, troviamo di poter lavorare solo con le costanti fondamentali, come la costante di Planck h, la costante di Newton G, e la velocità della luce c. A partire da queste costanti si può formare con le unità di lunghezza una sola quantità, la radice quadrata di Gh/c^3, che ha un valore numerico di circa 10^{-35} cm. Questo modo di pensare è lontano da quello a cui siamo abituati nella vita quotidiana, ma qualche riflessione sul significato di una dimensione naturale suggerisce che le leggi basilari della natura dovrebbero essere formulate press'a poco a tali distanze, così che le dimensioni naturali entrino in gioco in modo semplice. Questi numeri, che ricaviamo da approcci diversi, sono sempre press'a poco gli stessi. Tutti questi argomenti suggeriscono che la teoria primaria dovrebbe assumere la sua forma più semplice a una scala di distanze di circa 10^{-33} cm. Questa è nota come la «scala di Planck», in onore di Max Planck, che fu il primo a introdurre argomentazioni di questo tipo all'inizio del Novecento. In un certo senso la distanza di Planck è la dimensione naturale per l'universo. Quel che si deve spiegare è perché dovrebbero esistere cose della nostra grandezza, di trentacinque potenze del dieci maggiori.

La distanza di Planck è solo un centinaio di volte più piccola della scala a cui si unificano le forze debole, elettroma-

gnetica e forte: ciò conduce i teorici ad attendersi che si troveranno altre predizioni sperimentalmente verificabili. Anche se attualmente comprendiamo troppo poco la teoria per poter offrire un esempio convincente, possiamo attenderci che, in conseguenza della vicinanza della scala di Planck alla scala dell'unificazione, ci saranno varie modificazioni alle predizioni concernenti le proprietà del decadimento del protone, le masse dei neutrini e persino l'angolo θ_w: altrettanti argomenti attualmente in studio.

Ci sono limiti alla comprensione?

Spero che le argomentazioni esposte nelle ultime pagine siano valse a stabilire l'effettiva possibilità di sottoporre a test con i criteri tradizionali della fisica le teorie che ambiscono al rango di teoria primaria, anche se questa dovrebbe assumere la sua forma più semplice a distanze che possono essere scandagliate solo indirettamente con dati sperimentali. C'è un altro problema: per qualche ragione noi potremmo non riuscire a formulare una tale teoria. Forse la scienza ha dei limiti, e il massimo che noi possiamo fare è descrivere in che modo la natura funziona, ma non capire perché essa sia così com'è. Sono state fornite varie spiegazioni a sostegno della tesi che non riusciremo a trovare una teoria primaria, a raggiungere una comprensione del perché, per usare la terminologia del capitolo 7. Ragioni simili vengono fornite a volte per sostenere che gli esseri umani non riusciranno a capire la coscienza umana. In precedenza (nei capitoli 7 e 9) ho commentato in breve perché non sono convinto dagli argomenti finora addotti per sostenere che la scienza ha dei limiti, o che non possiamo costruire una teoria primaria o conseguire una comprensione del perché. Ovviamente l'assenza di argomenti convincenti contro un tale successo non ci assicura che esso sarà conseguito.

Noi non sapremo se l'uomo potrà trovare una comprensione del perché fino a quando non sarà stata sviluppata una

teoria primaria – la quale risolverebbe il problema in un certo senso – o fino a quando tutti non avranno rinunciato a provare, cosa che lo risolverebbe nell'altro. Finora, nella scienza, è stato utile continuare a provare, e questo modo di comportarsi continuerà per molto tempo, indipendentemente dagli argomenti che potranno essere addotti per l'una o per l'altra parte.

12
Fisica delle particelle, astrofisica e cosmologia

Oggi c'è una crescente sovrapposizione fra queste tre discipline

TRADIZIONALMENTE, i fisici delle particelle studiano le cose più piccole nell'universo, mentre i cosmologi si occupano delle più grandi, compreso l'universo stesso. Gli astrofisici investigano la fisica di oggetti astronomici, stelle, galassie ecc. Gli astronomi osservano e analizzano i fenomeni astronomici. Qualcuno può occuparsi al tempo stesso di cose di competenza di più discipline. È già in uso l'espressione « astrofisica delle particelle », e forse dovremmo attenderci a breve termine anche la « cosmofisica ». In questo capitolo esamineremo in breve come la fisica delle particelle, l'astronomia, l'astrofisica e la cosmologia si influenzino oggi reciprocamente, specie quando si tratta di capire il big bang, la materia oscura e il problema del perché nell'universo ci sia più materia che antimateria.

Il big bang

Oggi è opinione quasi universalmente accettata che il nostro universo abbia avuto inizio con una immane esplosione, il big bang, circa 15 miliardi di anni fa. Secondo questa teoria, tutta la materia, e lo spazio stesso, occuparono inizialmente una regione molto piccola. A partire dal big bang l'universo avrebbe iniziato la sua espansione. Esistono varie prove a sostegno di questa teoria, la quale si è consolidata sempre più man mano che venivano accumulandosi nuove osservazioni. Innanzitutto, l'espansione dell'universo è osservabile direttamente: tutte le galassie accessibili ai nostri telescopi si stanno allontanando l'una dall'altra e da noi. Poiché la luce si propaga a una velocità fissa, la luce di stelle lontane

che vediamo oggi ha cominciato il suo viaggio molto tempo fa, e l'informazione che essa ci fornisce ci dice che l'universo era in espansione già allora.

Subito dopo il big bang, l'universo era un gas denso di particelle di ogni genere (comprendendo tutti i quark e i leptoni e i bosoni e tutte le altre particelle che troveremo estendendo la teoria standard), le quali si muovevano a caso, urtandosi fra loro e subendo tutte le reazioni possibili. Al proseguire dell'espansione, l'universo si raffreddò. Questa è una cosa familiare: se si usa una bomboletta di vernice spray, il gas compresso all'interno si espande e la bomboletta si raffredda. Inversamente, se si pompa dell'aria in un pneumatico, l'aria si comprime e il pneumatico si riscalda. Dopo molto tempo la maggior parte delle particelle originarie (bosoni *W*, quark *top* ecc.), essendo instabili, erano decadute. Dapprima ci fu abbastanza energia per la produzione, attraverso collisioni, di altri bosoni *W*, quark *top* ecc., ma al calare della temperatura le particelle vennero ad avere sempre meno energia, e non si produssero più particelle instabili pesanti. Infine le particelle sparirono completamente.

Un po' di tempo dopo la temperatura era scesa al punto che i quark poterono combinarsi a formare protoni e neutroni. Alcuni protoni e neutroni si unirono a formare deuterio, e alcuni nuclei di deuterio si legarono a formare nuclei di elio (ognuno con due protoni e due neutroni). I calcoli mostrano che, dopo un po', i nuclei presenti nell'universo erano per il 93 per cento di idrogeno e per il 6 per cento di elio. Inoltre c'erano grandi quantità di fotoni e di neutrini, risultanti dall'annichilazione e dal decadimento di altre particelle.

Questa storia dell'universo conduce a due previsioni quantitative che sono confermate con buona precisione dall'osservazione. La prima è quella dell'« abbondanza dell'elio », ossia della quantità relativa di questo gas osservata nell'universo. A partire da questa storia, si possono calcolare esattamente le energie attese dei fotoni residui, le quali corrispondono, con un margine d'errore inferiore all'uno per cento, alle energie

osservate (questa è la seconda previsione confermata). I fotoni residui della fase iniziale dell'universo vengono detti, con espressione tecnica, la « radiazione di fondo a microonde », e le energie osservate dei fotoni sono la loro « temperatura ». La storia del big bang e le osservazioni ad essa associate sono descritte in modo molto chiaro da Steven Weinberg nel libro *I primi tre minuti.**

Secondo la teoria della gravitazione di Einstein, energia e massa sono correlate, cosicché un qualsiasi oggetto in possesso di energia attrarrà gravitazionalmente altri oggetti. I neutrini prodotti dal decadimento di altre particelle esercitano un'attrazione gravitazionale su tutte le particelle. Questa rallenta l'espansione, cosicché il numero dei neutrini dei diversi tipi esistenti influisce sulla velocità dell'espansione dell'universo. Una diversa velocità di espansione inciderebbe sulla predizione dell'abbondanza attuale di elio. Il calcolo può essere eseguito facendo l'ipotesi che esistano due, tre, quattro o più tipi di neutrini, dopo di che si può confrontare la predizione con la frazione dell'elio osservata. I tre neutrini noti forniscono la risposta giusta, mentre due o quattro neutrini avrebbero fornito una predizione in disaccordo con l'osservazione. Quando si studiò col LEP (a partire dal 1989) il decadimento del bosone *Z*, si poté dedurre quanto spesso una particella *Z* veniva creata e poi decadeva producendo neutrini, anche se i neutrini sfuggono al rivelatore. I risultati mostrano che i tre neutrini noti, ν_e, ν_μ e ν_τ, spiegano esattamente le osservazioni del LEP. Ciò conferma la validità degli argomenti di cosmologia e rafforza la nostra fiducia nella descrizione della visione dell'universo del big bang.

I primissimi istanti della storia del big bang possono offrire agli scienziati un'opportunità di imparare qualcosa su regimi di fisica delle particelle che non sono direttamente accessibili all'esperimento. Subito dopo il big bang, 10^{-43} secondi dopo l'inizio, le energie delle particelle erano così grandi che,

* Steven Weinberg, *I primi tre minuti*, trad. it. di L. Sosio, Mondadori, Milano, 1977. (*N.d.T.*)

effettivamente, il big bang stesso offrì un microscopio fino a distanze alla scala delle ipotetiche superstringhe menzionate nel capitolo 11; forse si potrebbe dedurre qualche conseguenza delle interazioni delle superstringhe verificabile attraverso il confronto con l'osservazione. Un po' dopo (a 10^{-40} secondi) si raggiunse la scala delle grandi teorie unificate. Fino a quel tempo vari bosoni pesanti associati alla forza unificata avrebbero interagito con le particelle della teoria standard. Quando l'universo si raffreddò oltre questo livello, quei bosoni decaddero e non ne vennero prodotti altri, ma la loro breve presenza potrebbe avere influito su qualcosa che possiamo osservare oggi.

La materia oscura

Un'area affascinante della ricerca attuale è lo studio della materia oscura (capitoli 9 e 10), che rappresenta un'altra importante intersezione della fisica delle particelle con la cosmologia e l'astrofisica. Se l'universo contiene molta materia, la mutua attrazione reciproca di tutte le masse rallenterà infine l'espansione sino a farne invertire la direzione, e l'universo collasserà su se stesso. Se invece la materia contenuta nell'universo rimane al di sotto di un certo limite, l'espansione continuerà per sempre. Fra queste due possibilità alternative c'è una quantità esatta di materia in corrispondenza della quale l'espansione dell'universo rallenterà di continuo senza però mai essere seguita da un collasso. In questo caso si parla solitamente di una « chiusura esatta dell'universo » o di un « universo piatto ».

Una parte della materia dell'universo è visibile, ovviamente, sotto forma di stelle, mentre un'altra parte si presenta nella forma di nubi di « polvere » che sono illuminate dalla luce di stelle. Si era soliti supporre che tutta la materia esistesse in queste forme, ma ora pensiamo che una parte di essa sia oscura, invisibile all'osservazione tradizionale tranne che per i suoi effetti gravitazionali. Parlando delle quantità

dei diversi tipi di materia si è soliti definire il rapporto di un tipo dato di materia alla quantità necessaria per chiudere esattamente l'universo. Il simbolo usato per denotare questo rapporto è Ω (la lettera greca omega maiuscola). Se l'universo è esattamente chiuso, allora $\Omega_{TOTALE} = 1$. Il simbolo Ω_X potrebbe stare per qualsiasi tipo di materia nell'universo attuale; per esempio, x = VIS per la materia visibile, oppure x = SUSY per i partner supersimmetrici, oppure ancora x = TOTALE per la somma di tutte le forme di materia. Il valore di Ω_X si calcola prendendo la quantità di materia di tipo x e dividendola per la quantità di materia richiesta per chiudere l'universo.

Molti cosmologi e fisici delle particelle si attendono, in conseguenza di argomenti teorici, che $\Omega_{TOTALE} = 1$. Gli astronomi misurano le quantità di materia in vari modi. Per esempio, l'osservazione del moto di una galassia permette loro di dedurre a quanta attrazione gravitazionale la galassia sia soggetta da parte di altra materia. I risultati da loro trovati rientrano di norma nell'intervallo da $\Omega = 0{,}2$ a $\Omega = 0{,}6$, con un grande margine di incertezza. Le osservazioni in corso, per esempio col telescopio spaziale Hubble, miglioreranno di molto la nostra conoscenza di Ω e ci diranno se effettivamente $\Omega = 1$.

Il discorso diventa molto interessante quando si calcola la quantità di materia composta dai barioni. Se teniamo conto dei dati desumibili da tutte le osservazioni e degli indizi indiretti, abbiamo $\Omega_{BARIONI} = 0{,}05 \pm 0{,}02$: una quantità troppo piccola per spiegare ciò che si osserva in altri modi o ciò che si attende la maggior parte dei cosmologi. Tale valore comprende la materia barionica nota in ogni forma, sulla base di prove dirette e indirette. La parte visibile della materia è sotto forma di stelle, come il nostro Sole, fatte degli stessi protoni, neutroni ed elettroni di cui è composto il nostro stesso corpo, e di «polvere» interstellare che, quando i suoi atomi sono eccitati, emette raggi X. Se effettivamente $\Omega_{TOTALE} = 1$, la maggior parte della materia dell'universo non è fatta di quark e di leptoni e non forma stelle. È «materia oscura», formata da particelle diverse da quelle di cui siamo fatti noi.

La fisica delle particelle è pertinente per lo studio della materia oscura, poiché quest'ultima è prevista dalle estensioni della teoria standard. Ci siamo già imbattuti in due possibilità: i neutrini dotati di massa e i partner supersimmetrici. Se i neutrini hanno massa, contribuiscono al contenuto di materia oscura dell'universo. Non c'è ancora alcun argomento convincente per stabilire quanto possa essere grande la massa nei neutrini, ma rozzi modelli della fisica delle particelle conferiscono al neutrino tauonico una massa tale per cui Ω_ν risulta compreso fra 0,1 e 0,5. Se effettivamente il neutrino tauonico ha tale massa, è probabile che gli esperimenti in corso al CERN e al Fermilab consentano di misurarla. Ancora più notevole, a mio modo di vedere, è il fatto che il partner supersimmetrico più leggero (vedi il capitolo 10) sia un buon candidato per la materia oscura. Se nel denso gas di particelle generato dal big bang si includono i partner supersimmetrici, si può calcolare il numero di queste particelle che rimasero quando l'universo si raffreddò, e da tale risultato si desume il valore attuale $\Omega_{SUSY} = 0,5 - 1$. La materia oscura fu predetta da studi di supersimmetria all'inizio degli anni '80, molto tempo prima che la materia oscura non barionica venisse stabilita come un chiaro risultato d'osservazione dall'astronomia. La predizione dell'esistenza della materia oscura da parte della fisica delle particelle sarebbe stata fatta con o senza l'osservazione astrofisica. Se negli acceleratori si scopriranno superpartner, sarà possibile misurare la massa del superpartner più leggero, la particella della materia oscura, e poi calcolare la Ω_{SUSY}.

Le teorie unificate delle particelle danno di norma automaticamente sia neutrini dotati di massa sia superpartner, cosicché predicono un misto delle due forme di materia oscura. I neutrini sono molto leggeri, si muovono rapidamente e sono chiamati «materia oscura calda», mentre i superpartner più leggeri hanno massa considerevolmente maggiore e si muovono lentamente: sono «materia oscura fredda».

Finora nessuna teoria è abbastanza ben compresa da permettere di fare previsioni sulle quantità relative della materia oscura calda e fredda, ma vari fisici stanno cercando di migliorare la nostra comprensione e di fare tale previsione. In anni recenti due diversi risultati forniti dall'astrofisica hanno indicato che un miscuglio di circa due terzi di materia oscura fredda e un terzo di materia oscura calda potrebbe spiegare molto bene ciò che si osserva. Un insieme di risultati proviene da osservazioni della radiazione di fondo a microonde registrate dal satellite Cosmic Background Explorer (COBE), e l'altro da studi su come possa essere descritta nel modo migliore la formazione di strutture come galassie e ammassi di galassie. La comprensione della materia oscura è uno fra i problemi scientifici centrali del nostro tempo, e richiede necessariamente una combinazione di fisica delle particelle, astrofisica e cosmologia.

La « asimmetria barionica »

Ricordiamo, dal capitolo 4, che quark e gluoni si combinano in adroni di due tipi: mesoni, composti di quark e antiquark, e barioni (compresi il protone e il neutrone), fatti di tre quark. Tutti i mesoni, e tutti i barioni eccezion fatta per il protone e per il neutrone, sono instabili e decadono rapidamente. (Anche i neutroni liberi decadono, sebbene molto lentamente, mentre, per ragioni sottili, i neutroni nei nuclei non decadono.) Il nostro mondo è dunque composto da barioni ed elettroni.

Come tre quark formano un barione, così tre antiquark formano un antibarione. Poiché anche le antiparticelle sono solo particelle, non abbiamo alcuna ragione nota per attenderci che nell'universo esistano più barioni che antibarioni. Se l'universo avesse effettivamente un numero uguale di barioni e di antibarioni, potremmo immaginare che fossero stati creati da concentrazioni di energia (come si fa negli acceleratori), e poi in qualche modo fossero stati separati.

Nel caso invece che l'universo, come pare che sia, fosse fatto in realtà solo di barioni, dovremmo domandarci in che modo essi abbiano avuto origine: pare infatti che non ci sia un meccanismo che possa dare solo barioni, senza la loro antiparticella.

Barioni e antibarioni potrebbero esistere in numero uguale anche se nella nostra parte dell'universo non ci sono antibarioni? Le prove sembrerebbero indicare di no. Poiché nella maggior parte dell'universo la materia è sotto forma di atomi elettricamente neutri, se protoni e antiprotoni fossero in numero uguale ci sarebbe anche un ugual numero di elettroni e positroni (antielettroni). Non sono rare le collisioni fra galassie, e nell'ipotesi che una galassia di materia entrasse in collisione con una galassia di antimateria, si annichilerebbero grandi quantità di elettroni e positroni. In tali condizioni si produrrebbe un gran numero di fotoni di energia ben definita nota, cosicché si continuano a fare esperimenti alla ricerca, finora vana, di tali fotoni. Un'analisi accurata di queste argomentazioni suggerisce come molto probabile che il nostro universo sia composto per intero o quasi per intero da materia, anziché da un misto in parti uguali di materia e antimateria.

All'inizio tale risultato sembrava implicare che non saremmo mai pervenuti a capire l'origine della materia nel nostro universo. Nel 1967, però, il fisico teorico russo Andrej Sacharov (ben noto anche come dissidente e sostenitore dei diritti civili) sottolineò che – qualora le leggi che descrivevano la natura avessero soddisfatto varie condizioni – sarebbe stato possibile passare da un numero uguale di barioni e antibarioni al big bang a un universo composto principalmente da barioni. La maggior parte delle condizioni di Sacharov sono richieste che devono essere soddisfatte dalla fisica delle particelle. Pur essendo espressa in un linguaggio diverso, dovuto al fatto che la sua opera era anteriore alla teoria standard, la sua condizione più speculativa richiedeva l'esistenza di un'interazione in grado di trasformare quark in leptoni. In effetti le grandi teorie unificate descritte nel capitolo precedente

fanno proprio questo. Persino dopo la formulazione di tali teorie, occorsero ancora vari anni prima che ci si rendesse conto che esse potevano spiegare la asimmetria barionica osservata dell'universo. Poi vari teorici cominciarono a costruire modelli per vedere se potesse emergerne la giusta soluzione. Noi oggi non conosciamo ancora l'esito di tali ricerche, tuttora in corso. È possibile sviluppare modelli che diano la soluzione giusta, ma finora solo facendo assunti difficili da verificare.

La maggior parte delle ricerche sul problema dell'asimmetria dei barioni rientra nell'area della fisica delle particelle, ma una grande incertezza è legata a uno stretto miscuglio di fisica delle particelle e di cosmologia. Quando l'acqua si raffredda, a un certo punto compie una « transizione di fase », trasformandosi in ghiaccio. Anche l'universo, raffreddandosi, passa per transizioni di fase. La loro comprensione può essere richiesta per derivare la asimmetria dei barioni.

Gli esperimenti che cercano il decadimento del protone hanno un'incidenza anche sul problema dell'asimmetria dei barioni, giacché un protone può decadere solo attraverso la trasformazione di una parte dei suoi quark in leptoni. Se si osserveranno protoni decadere (nel capitolo 5 abbiamo descritto qualche esperimento), avremo una prova sperimentale diretta del fatto che tale interazione esiste, e saremo in grado di dedurre se essa abbia o no le proprietà giuste per produrre la asimmetria dei barioni. Qualsiasi spiegazione dell'asimmetria barionica deve includere una dimostrazione del fatto che essa genera una asimmetria dei barioni abbastanza grande, senza contraddire i dati sul decadimento del protone.

L'inflazione e l'origine delle strutture a grande scala

Due fra gli argomenti principali delle attuali ricerche in cosmologia potrebbero dipendere dalla sottostante fisica delle particelle. Per varie ragioni, si pensa che il ritmo di espansione dell'universo ai suoi inizi non sia stato molto uniforme e che in particolare ci sia stato un breve periodo di espansione rapidissima seguito da un brusco rallentamento che ha condotto alla velocità attuale. Il periodo di rapida espansione è noto come l'« universo inflazionario ». Le equazioni che lo descrivono dipendono da una conoscenza di tutti i campi dei bosoni di Higgs e di campi affini che erano presenti all'inizio dell'inflazione, così che la teoria dell'universo inflazionario non potrà essere compiutamente sviluppata fino a quando non si conoscerà la fisica delle particelle pertinente.

Si pensa che le strutture che vediamo oggi nell'universo si siano formate semplicemente per attrazione gravitazionale. Se, durante l'espansione del gas denso e caldo di particelle, si formarono piccole concentrazioni di energia, altre particelle furono attratte verso le concentrazioni di massa maggiore. Le regioni più dense si trasformarono infine in ammassi di galassie, le regioni meno dense in vuoti. Il problema cruciale è che cosa determini le fluttuazioni e le concentrazioni di densità iniziali; è qui che entra in gioco la fisica delle particelle. Per produrre concentrazioni che concordino con le condizioni cosmologiche, la teoria della fisica delle particelle deve soddisfare varie condizioni, che forniscono test importanti.

La fisica delle cosmoastroparticelle

L'unificazione delle cose più piccole e delle cose più grandi nell'universo, comprendendo in queste ultime anche la cosa più grande di tutte – l'universo stesso –, è una delle tendenze più significative degli anni recenti in fisica. Ogni scienza si rese conto di avere bisogno della collaborazione delle altre. Forse cosmologi, astrofisici e fisici delle particelle, lavorando insieme, ci aiuteranno a trovare le soluzioni. Forse per completare l'integrazione si richiederanno giovani fisici delle cosmoastroparticelle, addestrati in tutt'e tre le aree.

13
Capire un fiore

In quali rapporti è la fisica delle particelle col resto della fisica e col mondo in cui viviamo?

IMMAGINIAMO di avere capito la fisica delle particelle nel modo migliore possibile, addirittura al livello della comprensione del perché. Che cosa può dirci tale teoria su un fiore: i suoi colori, la sua complessità, il modo in cui esso si sviluppa e cresce, o muore? Quasi niente. La conoscenza del comportamento degli atomi ci aiuta a spiegare perché si formino le molecole, e ci permette di capire quali molecole siano più stabili di altre. A causa però dell'incredibile complessità di comportamento del numero immenso di molecole necessarie per il manifestarsi di un fenomeno come la vita, non siamo mai in grado di prevedere se esisterà – o non esisterà – una molecola in grado di autoreplicarsi. Conoscendo solo quark e leptoni e le loro interazioni, non saremo mai in grado di predire l'esistenza dei fiori. Né possiamo pensare che saremmo in grado di fare predizioni del genere se fossimo un po' più intelligenti; la complessità e il numero delle possibilità alternative sono così straordinariamente grandi che nella durata dell'universo non ci sarebbe abbastanza tempo per pervenire alla deduzione che debbano esistere rose rosse. Una parte del numero grandissimo di possibilità si realizzeranno, la maggior parte no.

Non vale l'opposto. Una volta che sappiamo che i fiori esistono, possiamo conseguirne una comprensione descrittiva. Possiamo capirne i colori in termini delle molecole che li compongono e delle proprietà della luce solare, possiamo capirne il materiale genetico e ogni stadio fino agli atomi che li compongono. Una volta che analizziamo un fiore al di sotto del livello del suo materiale genetico, siamo usciti dall'ambito specifico dei fiori e siamo entrati nel campo della

biologia molecolare. Possiamo meravigliarci per la bellezza di un fiore e per il suo profumo, e anche per il fatto che siamo in grado di capirlo scientificamente. Come scrisse nel 1963 Richard Feynman nelle sue lezioni di fisica: « Che uomini sono i poeti che sanno parlare di Giove se è simile a un uomo, mentre devono restare in silenzio se è un'immensa sfera rotante di metano e di ammoniaca? »

Usando la terminologia introdotta nel capitolo 7, possiamo avere di un fiore una comprensione descrittiva ma non una comprensione dei dati e dei meccanismi o una comprensione del perché. Per capire un fiore dobbiamo prendere come date le molecole che formano il suo materiale genetico: una volta che le abbiamo analizzate, abbiamo un piccolo insieme di molecole che compongono tutta la materia vivente, e non abbiamo più alcuna traccia del fiore. Il processo continua: se scomponiamo le molecole perveniamo ai novantadue elementi chimici, e non rimane più alcuna traccia dell'immensa diversità delle molecole. Possiamo avere una comprensione descrittiva delle molecole, ma l'esistenza degli atomi è qui solo qualcosa in funzione delle molecole; se si lavora al livello molecolare, gli atomi sono elementi basilari irriducibili. Se si rimane al livello del fiore, il problema se le molecole abbiano o no una struttura (combinazioni di atomi) non è solo irrilevante ma privo di senso.

Ogni comprensione scientifica è stata finora una comprensione descrittiva

Scientificamente, possiamo considerare la natura una gerarchia. Quark e gluoni formano protoni e neutroni, protoni e neutroni formano nuclei, nuclei ed elettroni formano atomi, questi formano molecole, le molecole formano molecole biologiche, queste formano cellule, le quali formano a loro volta organismi viventi, soltanto alcuni dei quali diventano coscienti. Quando rovesciamo questa sequenza e procediamo per così dire dall'alto al basso usiamo l'approccio

«Sono in procinto di compiere un grande progresso, ma sono anche sul punto in cui finisce la chimica e comincia la fisica, cosicché devo lasciar perdere tutto»

riduzionistico, che nel corso degli ultimi quattro secoli è stato immensamente produttivo. Senza di esso la scienza sarebbe stata impossibile. A ogni livello della gerarchia possiamo sperare di conseguire una comprensione descrittiva, ma non di più. A ogni livello ci sono elementi compositivi e/o princìpi che devono semplicemente essere accettati: i dati e i meccanismi rimangono inspiegati in termini di tale livello della gerarchia.

Se tutti i campi, più o meno grandi, della scienza mirano dunque a una comprensione descrittiva, non c'è nessun campo di cui si possa dire che sia più fondamentale di qualsiasi altro. La comprensione della fisica delle particelle raggiunta

dalla teoria standard, la comprensione della fisica atomica conseguita attraverso la conoscenza delle regole della teoria quantistica e della teoria della forza elettromagnetica, la crescente comprensione della fisica della materia condensata, la comprensione del codice genetico, sono altrettante forme di comprensione descrittiva. Tutte hanno essenzialmente lo stesso status logico.

C'è però un senso in cui la fisica delle particelle (o meglio la fisica delle cosmoparticelle) differisce da tutti gli altri campi. Consideriamo la sequenza in senso discendente: molecole biologiche, atomi, nuclei, protoni, quark. In ogni stadio la comprensione si fonda sulla semplice accettazione dello stadio immediatamente sottostante. Per esempio, nella fisica atomica i nuclei sono semplicemente accettati come oggetti elementari dotati di certe proprietà misurate. Ciò non significa che lo stadio precedente (o qualsiasi stadio) sia più fondamentale, dal momento che anch'esso ha i suoi meccanismi e i suoi dati misurati. L'attuale fisica delle particelle aspira però a raggiungere la comprensione dei dati e dei meccanismi, e anche la comprensione del perché. In altri termini, essa mira a non ricevere alcun dato dall'esterno e a cercare di capire perché ogni aspetto della teoria standard è così com'è (capitolo 11). La fisica delle particelle è un po' diversa dagli altri campi, perché i fisici che operano in essa sperano di giungere a tipi di comprensione non accessibili agli altri. È prematuro dire se questa branca della fisica riuscirà effettivamente a conseguire tali livelli di comprensione: se sì, diventerà più fondamentale di altri campi della scienza. Poiché la fisica delle particelle può mirare almeno a una comprensione più profonda di quella raggiunta da altri campi, c'è un senso debole in cui si potrebbe dire che è più basilare di altri; ma finché non sappiamo se tale comprensione più profonda possa o no essere effettivamente raggiunta, questa non è una distinzione importante.

Complessità e caos

Nel corso dell'intero sviluppo della fisica, si sono sempre opportunamente concentrati gli sforzi sui sistemi più semplici. Le equazioni della teoria quantistica possono essere usate, insieme a una conoscenza delle forze, per calcolare come si comporteranno i sistemi semplici. Può accadere che, quando si scrivono equazioni per un sistema di particelle complicato, il comportamento risultante dalle soluzioni delle equazioni possa essere molto diverso dal comportamento che si ottiene per una o due particelle. Il possesso di una comprensione descrittiva della fisica delle particelle non implica affatto che si abbia una comprensione della superconduttività o di un fiore, perché, quando sono in gioco molte particelle, possono emergere risultati del tutto diversi. A causa di ciò, molti sistemi in cui ci imbattiamo nel mondo quotidiano – come i fenomeni meteorologici, il flusso turbolento dell'acqua e molti altri – sono rimasti inaccessibili a una comprensione descrittiva.

Soprattutto dopo l'inizio degli anni '70 si è sviluppata una nuova branca della fisica di grande interesse, mirante a portare i sistemi complicati nell'ambito della fisica attraverso lo studio delle soluzioni delle equazioni che li descrivono: è la cosiddetta teoria della complessità o teoria del caos. Questa branca implica nuove tecniche, dalle quali i fisici sperano un aiuto nella comprensione di molti fenomeni in precedenza inaccessibili del mondo fisico quotidiano. (Le stesse tecniche vengono applicate, con molto ottimismo, a molti fenomeni biologici, sociali ed economici; io mi sto solo occupando della loro applicazione in fisica.) Questi nuovi approcci non sono in contraddizione con la teoria standard né forniscono aggiunte alle sue equazioni: essi presuppongono le regole della teoria quantistica e le forze della teoria standard, e concentrano il loro interesse sulle soluzioni delle equazioni della teoria, non sulle equazioni stesse. Nessuno, in effetti, ha ancora immaginato di applicare la teoria della complessità ai quark e ai leptoni. Le nuove tecniche hanno però molte

applicazioni nella fisica atomica e nella fisica della materia condensata. Si spera che la teoria della complessità e la teoria del caos possano apportare un contributo significativo alla conoscenza dei fenomeni di cui la scienza ha una comprensione solo descrittiva.

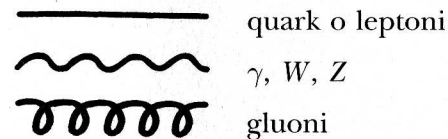
Fisica delle particelle e fiori

La comprensione dei quark e dei leptoni non ci permette di dedurre che esisterà un giardino fiorito o che esisteremo noi stessi. I botanici comprendono i fiori in stretto rapporto col processo di fotosintesi che fornisce energia alla crescita sotto forma di sostanze chimiche che assorbono alcuni colori della luce, mentre altri colori vengono riflessi e osservati, e via dicendo. Ma perché ha luogo la fotosintesi, e perché vengono assorbiti quei colori della luce e non altri? I chimici e i fisici atomici rispondono che ciò avviene a causa di certe proprietà degli atomi, che essi comprendono. Ma perché gli atomi hanno tali proprietà? Perché sono sistemi di elettroni legati a nuclei dalla forza elettromagnetica, che obbedisce alle regole della teoria quantistica. Che cosa sono i nuclei? Che cosa sono gli elettroni? Perché la forza elettromagnetica ha la forma che ha? Perché le regole della teoria quantistica sono quelle che sono? Ad alcune di queste domande risponde la teoria standard, ad altre potranno rispondere le estensioni della stessa teoria che sono attualmente oggetto di ricerche. Quale che possa essere l'esito finale della ricerca per comprendere i fiori in questo modo, in aggiunta a quello in cui li comprendono i poeti, le particelle e la loro teoria sono vicine alla fine della storia. Le particelle sono i semi di quel giardino che è il nostro mondo.

Appendice A

Che cosa può accadere in natura? I diagrammi di Feynman

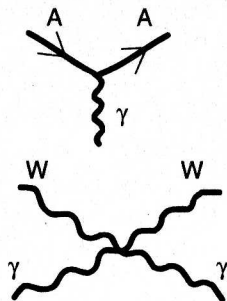
Gli ingredienti per calcolare la probabilità di una qualsiasi interazione fra particelle

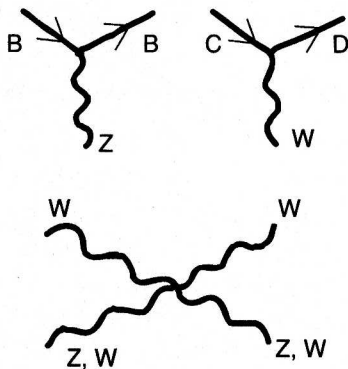
RICHARD FEYNMAN inventò un modo per incorporare le regole della teoria quantistica in diagrammi semplici ed eleganti, noti in suo onore come « diagrammi di Feynman ». Grazie ad essi è facile compendiare visivamente la teoria standard. Ogni particella è rappresentata da una linea. Per esempio:

Un diagramma con un certo numero di linee che si incontrano in un punto si dice vertice. Esistono solo alcuni vertici diversi (illustrati nella prossima sezione). Le regole sono le seguenti:

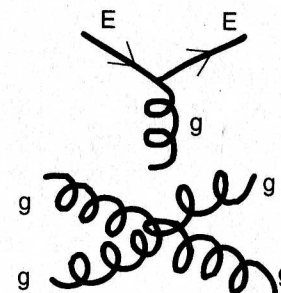
- Combinare i vertici in diagrammi più grandi in tutti i modi possibili.
- Ogni diagramma risultante rappresenta un possibile processo che può presentarsi in natura.
- C'è un insieme di regole matematiche per associare una probabilità di occorrenza col processo rappresentato da ogni diagramma. In particolare, ogni vertice ha un fattore numerico che rappresenta l'intensità della forza associata; il fattore numerico misura quanto sia importante il vertice per il processo considerato.
- Tutto ciò che può accadere in natura è rappresentato dai diagrammi che si ottengono combinando vertici.

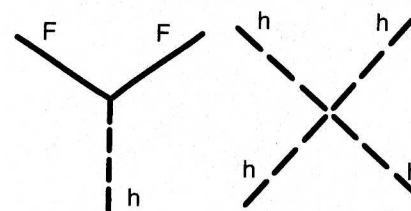
I vertici

Ecco i vertici per le interazioni debole, elettromagnetica e forte della teoria standard.

L'interazione elettromagnetica

A = e, μ, τ, u, d, s, c, b, t, W (ma non ν, γ, g, Z)

L'interazione debole

B = e, μ, τ, ν_e, ν_m, ν_τ, u, d, s, c, b, t, W (ma non γ, g, Z)
$C \rightarrow D$ = $d \rightarrow u$, $s \rightarrow c$, $b \rightarrow t$, $e \rightarrow \nu_e$, $\mu \rightarrow \nu_\mu$, $\tau \rightarrow \nu_\tau$;
$s \rightarrow u^*$, $s \rightarrow t^*$, $d \rightarrow c^*$, $b \rightarrow c^*$; $b \rightarrow u^{**}$, $d \rightarrow t^{**}$

L'interazione forte

E = u, d, c, s, b, t, g (ma non γ, e, μ, τ, ν, Z, W)

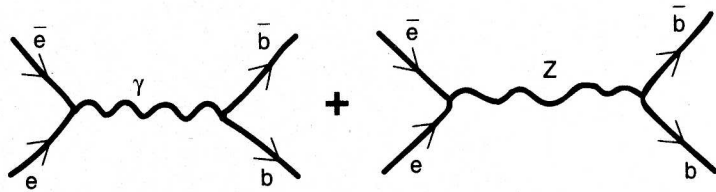
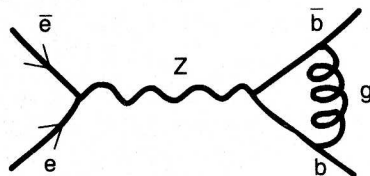
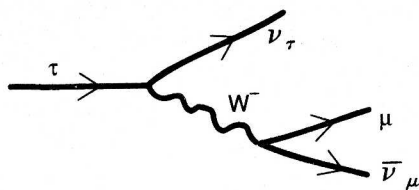
L'interazione di Higgs

F = e, μ, τ, u, d, c, s, t, b, W, Z, h (ma non ν, γ, g)

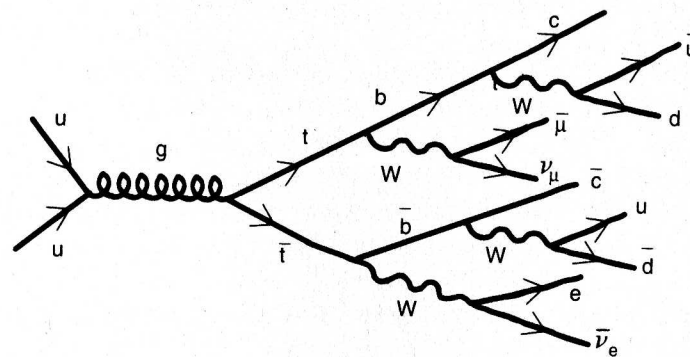
Per tutti questi vertici il fattore che rappresenta l'intensità della forza è un numero variabile da circa 0,25 a circa 1,5, eccezion fatta per alcuni fenomeni illustrati sotto l'interazione debole, $C \rightarrow D$ implicante bosoni W; per questi i vertici con un * sono circa 20 volte minori, e quelli con ** sono circa 400 volte minori. L'intensità dell'interazione dei bosoni di Higgs è proporzionale alla massa della particella interagente. Ogni vertice è accompagnato da un secondo per il quale ogni particella si trasforma nella sua antiparticella e tutte le frecce sono rovesciate. Quando non compare alcuna freccia, il fenomeno può procedere in entrambe le direzioni. Quando ν non ha alcun pedice, può essere uno qualsiasi dei tre neutrini.

Esempi di processi

La probabilità che un processo si verifichi è determinata in gran parte dai diagrammi più semplici che possono essere costruiti. Si possono sempre aggiungere diagrammi più complicati che vanno da uno stato iniziale dato a uno stato finale dato, ma essi modificano solo di poco la probabilità. Ecco vari esempi di come costruire diagrammi più complicati a partire dai vertici. Le antiparticelle sono rappresentate col simbolo della relativa particella soprassegnato. Se non è possibile disegnare diagrammi per un processo, la teoria standard predice che esso non avrà luogo.

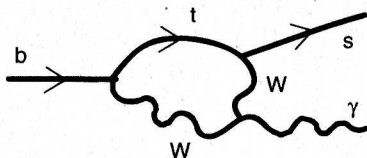
Il processo $\overline{e} + e \rightarrow + \overline{b} + b$

I diagrammi più semplici sono:

Un diagramma più complicato che cambia la probabilità di poche unità percentuali è:

Decadimento di $\tau : \tau \rightarrow \nu_\tau + \mu + \overline{\nu}_\mu$

La produzione di quark top

Nell'acceleratore del Fermilab si fanno entrare in collisione protoni e antiprotoni. A volte un quark nel protone entra in collisione con un antiquark nell'antiprotone. Possono allora accadere molte cose diverse, corrispondenti a tutti i diagrammi che possono essere disegnati, a cominciare da $q + \overline{q}$; per esempio, $q + \overline{q} = g + g$, $q + \overline{q} \rightarrow e + \overline{e}$, e molti altri processi. Ognuno di questi ha una probabilità definita. Un processo è la produzione di un quark t più un quark *antitop* $\overline{t}$. Le particelle t e $\overline{t}$ sono instabili, cosicché decadranno formando altri quark e leptoni. Ecco un diagramma che determina che cosa può accadere. Le particelle di cui non viene mostrato il decadimento emergeranno nel rivelatore. Questo è un tipo di evento usato per rivelare il quark *top*. Quest'intero processo ha luogo in circa 10^{-20} secondi.

Il decadimento di $\tau \rightarrow \mu + \mu + \overline{\mu}$

Non si può disegnare nessun diagramma, per quanto complicato, con una τ iniziale e con uno stato finale formato da due muoni e un antimuone. Questo è un processo che, se si verificasse con la stessa probabilità di $\tau \rightarrow \nu_\tau + \mu + \overline{\nu}_\mu$, vista sopra, falsificherebbe la teoria standard, oppure, se si verificasse con una piccola probabilità, contribuirebbe a insegnarci come estendere la teoria standard.

Il decadimento di $b \rightarrow s + \gamma$

Ecco un processo che non può verificarsi se si considerano solo diagrammi « ad albero » in cui le linee continuano a ramificarsi, poiché non si presenta nessun vertice con solo b e s e γ, come nell'insieme all'inizio di quest'appendice. Può però verificarsi qualora si includano cappi; il diagramma qui sotto è costruito con vertici permessi. I diagrammi con cappi hanno sempre una probabilità ridotta di presentarsi.

Quando la teoria standard sarà estesa

I vertici illustrati in quest'appendice sono tutto ciò che esiste se la teoria standard descrive l'intera natura. Tutto ciò che vediamo è dovuto a questi vertici, combinati in molti modi. Qualsiasi processo in biologia o in chimica, se viene decomposto passo passo nei suoi elementi, arriverà a questi vertici.

Se la teoria standard verrà estesa, si aggiungeranno altri vertici. Se il mondo è supersimmetrico, a ogni vertice della teoria standard si aggiungono tutti i vertici possibili con superpartner in sostituzione delle particelle (a coppie). Se si verificherà un'ulteriore unificazione delle forze, potrebbero entrare in gioco anche alcuni bosoni aggiuntivi. I vertici addizionali implicheranno il verificarsi di alcuni nuovi processi, o permetteranno ulteriori diagrammi, i quali potrebbero modificare la probabilità di alcuni processi esistenti.

Appendice B

Simmetrie interne e teoria standard

La simmetria di forze SU(3) × SU(2) × U(1); la rottura della simmetria SU(2)

Dopo lo sviluppo della teoria standard, alcune considerazioni sulle proprietà di simmetria di taluni sistemi fisici hanno aiutato a semplificare e a migliorare la nostra comprensione di tali sistemi. Ogni volta che un sistema fisico è invariante, o anche approssimativamente invariante, rispetto a un qualche mutamento, la teoria che lo descrive rifletterà tale invarianza. Per la teoria standard le simmetrie sono ancora più importanti: esse determinano in parte la forma della teoria, oltre a dare un grande aiuto nell'esecuzione e nella comprensione dei calcoli.

Consideriamo l'atomo di idrogeno. Nella teoria quantistica gli atomi esistono in livelli di energia discreti. L'equazione di Schrödinger che descrive l'atomo di idrogeno ci dice che alcuni di tali livelli si presentano più di una volta. Questa è una conseguenza di un'invarianza dell'interazione che lega l'atomo rispetto a rotazioni in laboratorio: i livelli di energia dell'atomo non cambiano se ruotiamo semplicemente l'atomo. I risultati osservati per insiemi di livelli di energia possono essere derivati tenendo conto dell'invarianza dell'atomo rispetto a rotazioni spaziali. Le masse delle particelle sono come i livelli di energia degli atomi, cosicché, ogni volta che insiemi di particelle hanno masse simili, può valere la pena di cercare invarianze.

Le nuove simmetrie che sono alla base delle relazioni fra particelle della teoria standard non sono collegate a trasformazioni nello spazio e nel tempo, bensì con mutamenti nell'identità di particelle. A volte è utile pensare i quark su e giù non come oggetti separati, privi di rapporti fra loro, ma come due stati diversi di una singola « particella »,

un « quark della famiglia 1 ». Fatto più importante, quando si aggiunge l'idea che la forma che la teoria assume non può dipendere dal fatto che il quark della famiglia 1 sia « su » o « giù » o in uno stato intermedio, allora si possono fare certe previsioni, le quali sono poi confermate dall'esperimento. Quando la teoria è invariante (in quest'esempio ciò significa permettere che il quark della famiglia 1 sia una qualsiasi combinazione di quark su e giù), allora c'è una simmetria che ha spesso un'elegante formulazione matematica.

Per capire meglio questo concetto, consideriamo neutroni e protoni. Essi hanno una simmetria simile a quella di quark e leptoni, ma più facile da visualizzare. Neutrone e protone hanno quasi la stessa massa (il neutrone è 1,0014 volte più pesante del protone); nessun'altra particella ha una massa simile. Neutroni e protoni formano nuclei, e interagiscono fra loro e similmente con nuclei. Perché pensiamo a queste due particelle come a oggetti diversi? Ovviamente perché il protone ha una carica elettrica e il neutrone no.

Le interazioni nucleari non dipendono però in alcun modo dalla carica elettrica e sono molto più intense delle interazioni elettromagnetiche, cosicché la carica elettrica è, in un certo senso, solo una perturbazione minore. Questo ragionamento ha condotto all'idea che neutroni e protoni dovrebbero essere considerati in realtà due stati diversi di una singola « particella »: il nucleone. Quando tali idee sono formulate matematicamente, è naturale generalizzarle e immaginare uno spazio: lo « spazio nucleonico ». Questo è uno spazio immaginario, che noi chiamiamo « interno », in cui un nucleone può essere orientato in qualsiasi direzione. Se è orientato (diciamo) in su, è un protone, se in giù è un neutrone, e se in qualche altra direzione è uno « stato misto ». La carica elettrica è quindi in questo spazio una sorta di etichetta.

Generalizzazioni come questa sono spesso molto produttive in fisica, ma perché questo approccio sia utile devono valere varie condizioni. Innanzitutto, la forma che la teoria assume deve implicare che negli esperimenti saranno osservabili solo il neutrone e il protone, ma non gli stati misti orientati in altre direzioni. In secondo luogo, essa deve fare alcune predizioni su interazioni di neutroni e protoni che non siano valide se si considerano neutroni e protoni semplicemente come particelle separate. In terzo luogo, nello spazio nucleonico dovrebbero trovar posto in qualche modo anche altre particelle.

Tutte queste condizioni sono soddisfatte, e lo spazio nucleonico si è rivelato effettivamente un modo utile per capire le interazioni di protoni, neutroni e altri adroni (per ragioni storiche parleremo di spazio « di spin isotopico forte » anziché di spazio nucleonico).

Più difficile è immaginare di applicare il tipo di ragionamento dello spazio interno a quark e leptoni, che sembrano molto diversi fra loro; in realtà, però, questo approccio si rivela estremamente efficace. La formulazione matematica della teoria standard usa tre spazi interni diversi. Uno è un cerchio immaginario. Se una particella si muove lungo la sua circonferenza conserva la sua identità, ma la sua rappresentazione matematica viene moltiplicata per un fattore dipendente dalla distanza percorsa dalla particella attorno al cerchio. La richiesta di invarianza implica che le equazioni della teoria possono contenere solo termini che non vengono modificati da quel fattore di moltiplicazione; la forma che la teoria può assumere è ristretta in modo significativo da questa richiesta. Il linguaggio matematico usato per descrivere questa simmetria è chiamato teoria dei gruppi; la particolare simmetria corrispondente a un'invarianza rispetto a questi fattori di moltiplicazione si chiama una simmetria U(1) (in terminologia tecnica si tratta di un « gruppo unitario con un parametro »).

Il secondo dei tre spazi interni è chiamato spazio « di spin isotopico debole », per analogia con lo spazio di « spin isotopico forte » del protone e del neutrone. Nello spazio di spin isotopico debole ogni coppia nelle colonne di riquadri verticali nella figura 4.1 (a p. 72) si comporta come il protone e il neutrone. C'è un quark generale della famiglia 1 che è un

quark su quando è orientato in una direzione, un quark giù quando è orientato nella direzione opposta e un misto nelle altre direzioni. C'è un leptone generale della famiglia 2 che è un neutrino muonico quando è orientato in su e un muone quando è orientato in giù. Una richiesta importante perché tutto questo funzioni matematicamente è che la differenza di carica elettrica dello stato « su » meno lo stato « giù » sia sempre la stessa, perché in questo spazio la carica elettrica è solo un'etichetta, e questa richiesta è soddisfatta, poiché la differenza è in tutti i casi 1 (in unità della carica del protone). Nel linguaggio della teoria dei gruppi questa è una « simmetria SU(2) ».

L'unificazione delle interazioni elettromagnetica e debole nella teoria elettrodebole descritta nel capitolo 4 dice, da questo punto di vista, che lo spazio interno « circolare » della simmetria U(1) e lo spazio « di spin isotopico debole » SU(2) sono in realtà spazi in qualche misura connessi.

Il terzo spazio interno è quello per le etichette di colore delle particelle, uno spazio tridimensionale per ogni quark. Se il quark è orientato in una certa direzione è un quark rosso, se in una direzione perpendicolare alla precedente è un quark blu ecc. Questo è uno spazio SU(3). Le righe orizzontali dei riquadri per i quark nella figura 4.1 contengono gli stati che si mescolano in questa simmetria; i leptoni hanno un solo stato e non presentano alcuna proprietà importante rispetto a questa simmetria.

Le richieste imposte alla forma matematica permessa alla teoria, una volta che si sappia che queste richieste dovrebbero essere soddisfatte, sono molto forti, tanto da determinare quasi totalmente la teoria stessa. Per ragioni storiche, le invarianze dei tipi che sto descrivendo qui sono dette « invarianze di gauge », e le teorie da esse determinate « teorie di gauge ». Le tre simmetrie che conosciamo determinano la forma delle equazioni della teoria standard. Se ci fosse un'ulteriore unificazione, avremmo, per usare lo stesso linguaggio, uno spazio interno maggiore, e ciascuno dei tre spazi interni che abbiamo trovato finora sarebbe una proiezione in un numero di « dimensioni » ridotto. Per esempio, se lo spazio maggiore fosse una sfera e si guardasse solo una sezione di questa, tale sezione sarebbe un cerchio.

Buona parte dell'attività dei fisici delle particelle in vista di un'estensione della teoria standard si esprime nella forma di congetture su uno spazio interno maggiore, che potrebbe includere le simmetrie U(1), SU(2) e SU(3), e nella ricerca di previsioni che consentano di sottoporre a verifica tale ipotesi. La matematica della teoria dei gruppi limita fortemente gli spazi possibili, cosicché, seguendo un misto di indizi matematici e sperimentali, si può essere facilitati nel compito di produrre una descrizione migliore.

Appendice C

La violazione CP

ALLA metà degli anni '60 fu osservato un effetto piccolo ma estremamente interessante, la cosiddetta «violazione *CP*». Questa potrebbe essere uno dei pochi indizi che abbiamo per risolvere il mistero di come estendere la teoria standard.

Con la sigla *CP* si indica un'operazione che può essere eseguita sulle equazioni che descrivono interazioni di particelle. Supponiamo che un'equazione descriva il comportamento di elettroni, compreso il modo in cui interagiscono. A tale equazione può essere allora applicata un'operazione detta «coniugazione di carica» e simboleggiata con *C*. L'operazione è definita in modo tale che essa converte l'elettrone in un antielettrone (positrone) e apporta certe modifiche ai termini nell'equazione (principalmente, cambia il segno di tutte le cariche che appaiono nell'equazione). Si possono fare esperimenti per trovare se la nuova equazione descriva il comportamento dei positroni. In questo caso l'operazione *C* sarebbe una simmetria della natura. Dall'osservazione risulta che *C* è una simmetria delle interazioni forte ed elettromagnetica, ma non delle interazioni deboli. Nelle interazioni deboli risulta, di fatto, che la simmetria non è violata di poco (come sarebbe se i positroni presentassero solo lievi differenze di comportamento dagli elettroni) ma in modo «massimale», nel senso che alcuni processi deboli si verificano normalmente per gli elettroni mentre sono del tutto esclusi per i positroni. La teoria standard ingloba tutta questa informazione in un modo molto naturale, cosicché possiamo dire di averne una comprensione descrittiva.

Si può applicare anche un'altra operazione, chiamata «parità» o «riflessione spaziale» e indicata col simbolo *P*. La *P* rovescia il segno di tutte le coordinate, e implica ulteriori cambiamenti di segno per alcune particelle. Anche in questo caso abbiamo un'equazione, e gli esperimenti mostrano an-

che qui che *P* è una simmetria delle interazioni forte ed elettromagnetica, ma non delle interazioni deboli. Di nuovo queste violano la parità in modo «massimale»; alcuni processi che possono verificarsi per un sistema non si verificano affatto per quello riflesso. Di nuovo, tutto questo è incorporato in modo naturale nella teoria standard.

Una volta compresi questi risultati, ci si rese conto di una cosa notevole, ossia che l'operazione combinata del prodotto *CP* era una simmetria delle interazioni deboli, oltre che di quelle forti ed elettromagnetiche: l'effetto combinato sia di *P* sia di *C* su un'equazione che descrive un sistema conduceva sempre a una nuova equazione che descriveva un sistema realizzabile. Questa scoperta ebbe un effetto importante nell'aiutare a costruire la teoria standard.

Poi, nel 1964, un esperimento trovò che le interazioni deboli non erano perfettamente simmetriche rispetto a *CP*, ma questa volta la violazione era piccola anziché massimale. Un modo per presentare la grandezza dell'effetto è la seguente. Rappresentiamo con A la probabilità che un particolare mesone, chiamato K_L, decada trasformandosi in un pione con carica negativa (π^-) più un positrone e un neutrino elettronico, e con A' la probabilità che la stessa particella decada dando un pione con carica positiva (π^+) più un elettrone e un antineutrino elettronico. A e A' sono esempi di processi connessi da una trasformazione *CP*: il mesone K_L è l'antiparticella di se stesso, e le altre particelle sono trasformate nelle loro antiparticelle. Se la *CP* fosse una perfetta simmetria, avremmo $A = A'$. L'esperimento dà $A/A' = 1{,}0066$ con buona precisione. Il rapporto si discosta dall'unità solo per alcuni millesimi.

Per trent'anni gli esperimenti sul decadimento del mesone *K* sono stati l'unico luogo in cui sono stati scoperti gli effetti della violazione *CP*, nonostante considerevoli sforzi per trovarne altri. Noi oggi comprendiamo che anche mesoni con un quark *b* dovrebbero essere un luogo molto buono in cui studiare gli effetti dell'operazione *CP*. Perciò sia gli Stati Uniti (allo SLAC) sia il Giappone (al KEK) progettano di costruire collisori in grado di produrre un gran numero di quark *b* (fabbriche di

quark b); questi impianti potrebbero cominciare a fornire dati molto presto. Inoltre particelle come elettroni e neutroni potrebbero avere proprietà utilizzabili come prove della violazione *CP*; è molto importante accertare se sia effettivamente così.

Ci sono due ragioni particolarmente forti per cui, secondo molti ricercatori, una migliore conoscenza della simmetria *CP* potrebbe fornire indizi importanti per una comprensione più approfondita della fisica delle particelle. Innanzitutto, se esistono tre famiglie di quark e di leptoni, diventa automaticamente possibile incorporare nella teoria standard una descrizione della violazione *CP* osservata: le equazioni risultanti includono necessariamente una quantità di violazione *CP* press'a poco uguale a quella che si osserva. Ciò non è invece possibile se esistono solo una o due famiglie. La ragione è molto tecnica (matrici due per due che mettono in correlazione fra loro autostati elettrodeboli e di massa dei quark possono sempre essere scritte come numeri reali, mentre matrici tre per tre hanno necessariamente elementi formati da numeri complessi). Ecco una connessione di un effetto osservato col grande rompicapo del perché ci sono tre famiglie! Fino a quando non avremo meglio compreso la violazione *CP*, non sapremo se questa connessione sia in qualche senso correlata col perché esistono famiglie, ma è interessante sperare che ci sia qualche rapporto.

In secondo luogo, una delle condizioni che secondo Sacharov (capitolo 12) devono essere soddisfatte perché si possa spiegare l'asimmetria barionica dell'universo è che la violazione *CP* deve esistere. Il fatto che essa esista è perciò molto incoraggiante, ma la situazione è più complicata. La violazione *CP* osservata nel decadimento dei kaoni non introduce necessariamente le equazioni pertinenti nel modo richiesto per produrre l'asimmetria barionica, e la quantità di violazione *CP* richiesta potrebbe essere maggiore di quella che si osserva. Esistono modelli per l'asimmetria barionica in cui la stessa violazione *CP* spiega tutto, e modelli in cui così non è. C'è un grande bisogno di nuovi dati sperimentali sulla violazione *CP* per vincolare e focalizzare gli approcci teorici.

Elenco di simboli

- γ — fotone; lettera greca gamma
- θ_w — angolo dell'unificazione elettrodebole; lettera greca theta con W
- μ — muone; lettera greca mi
- ν_e — neutrino elettronico; lettera greca ni con e
- ν_μ — neutrino muonico; lettera greca ni con mu
- ν_τ — neutrino tauonico; lettera greca ni con tau
- τ — tauone, particella tau; lettera greca tau
- Ω — rapporto della quantità della materia oscura di un dato tipo presente nell'universo alla quantità esatta richiesta per rallentare infine a zero la velocità dell'espansione; lettera greca omega maiuscola
- b — quark *bottom* o basso (o bellezza)
- c — quark *charm* o incanto; oppure, in altro contesto, la velocità della luce
- d — quark *down* o giù
- e — elettrone
- $E = mc^2$ — è l'equazione di Einstein che esprime la quantità di energia (E) che può essere ottenuta convertendo la massa (m) in energia, o la massa delle particelle che possono essere create convertendo l'energia fornita da una collisione in massa di particelle create; c è il valore della velocità della luce
- $F = m \times a$ — seconda legge di Newton; la forza (F) è uguale al prodotto della massa (m) per l'accelerazione (a)
- g — gluone
- G — costante di Newton
- h — costante di Planck
- s — quark *strange* o strano
- t — quark *top* o alto (o verità)
- u — quark *up* o su
- W — le particelle W sono bosoni di gauge elettrodeboli, con carica elettrica +1 o −1
- Z — la particella Z è un bosone di gauge elettrodebole, privo di carica elettrica

$10^1 = 10$, $10^2 = 100$, $10^3 = 1000$, 10^6 = un milione, 10^9 = un miliardo, $10^{-1} = 1/10$, $10^{-2} = 1/100$, 10^{-6} = un milionesimo, 10^{-9} = un miliardesimo

Elenco di abbreviazioni e di acronimi

ALEPH	rivelatore al LEP
BEPC	Beijing Electron-Positron Collider: acronimo del nome inglese del Collisore di elettroni e positroni di Pechino (Cina)
BNL	Brookhaven National Laboratory, Long Island (New York)
CDF	rivelatore al Fermilab
CERN	Organizzazione europea per la ricerca nucleare, Ginevra (Svizzera)
CESR	Cornell Electron Synchrotron, Ithaca (New York)
D0	rivelatore al Fermilab
DELPHI	rivelatore al LEP
DESY	Deutsches Elektronen-Synchrotron, Amburgo (Germania)
Fermilab	Fermi National Accelerator Laboratory, Chicago (Illinois)
HERA	collisore di elettroni e protoni al DESY
KEK	Laboratorio Nazionale per la Fisica delle Alte Energie, Tsukuba (Giappone)
L3	rivelatore al LEP
LEP	Large Electron-Positron Collider, al CERN
LHC	Large Hadron Collider progettato al CERN, dovrebbe entrare in funzione attorno al 2005
NLC	il « Next » Linear Collider: la possibilità di proporre un tale collisore è allo studio da parte di vari paesi, e particolarmente degli Stati Uniti, del Giappone e della Germania: si discute se costruire un impianto internazionale; dovrebbe essere un collisore di elettroni e positroni, con un'energia quattro o cinque volte superiore a quella dell'SLC dello SLAC
OPAL	rivelatore al LEP
PETRA	collisore di elettroni e positroni al DESY, ormai chiuso
QCD	Quantum Chromodynamics, cromodinamica quantistica: la teoria quantistico-relativistica dell'interazione forte
QED	Quantum Electrodynamic, elettrodinamica quantistica: la teoria quantistico-relativistica delle interazioni elettromagnetiche
SLAC	Stanford Linear Accelerator Center, Palo Alto (California)
SLC	collisore lineare di elettroni e positroni allo SLAC
SLD	rivelatore all'SLC
SPEAR	collisore di elettroni e positroni originario allo SLAC
SSC	Superconducting Supercollider, supercollisore a magneti superconduttori; il progetto è stato annullato; vedi il cap. 3

Glossario

Acceleratore
: Gli acceleratori sono macchine che usano campi elettrici per accelerare ad alte energie particelle dotate di carica elettrica (elettroni, protoni e le loro antiparticelle). Se gli acceleratori sono lineari, per impartire alle particelle le energie desiderate devono essere molto lunghi, cosicché si è optato per lo più per la forma circolare, e si usano magneti per chiudere in cerchio la traiettoria delle particelle e riportarle al punto di partenza, conferendo loro altra energia a ogni passaggio.

Acceleratori, fisica degli
: È il campo della fisica che studia come accelerare particelle ad alte energie, e come produrre fasci accelerati di maggiore intensità (luminosità).

Adrone
: Le proprietà della forza di colore e le regole della teoria quantistica permettono a quark (e antiquark) e gluoni di legarsi insieme in certe combinazioni a formare una particella; tutte le particelle così formate si chiamano adroni. La particella formata da tre quark si chiama « barione »; quella formata da quark e antiquark si chiama « mesone », e quella formata da soli gluoni *glueball* (gluopalla). Gli adroni hanno tutti un diametro di circa 10^{-13} cm. I barioni più familiari sono il protone e il neutrone. I pioni sono i più leggeri fra i mesoni, e sono quindi quelli che si producono con la maggiore frequenza nelle collisioni. I kaoni sono gli adroni più leggeri dopo i pioni, e hanno proprietà che li rendono utili in molti studi.

Alte energie, fisica delle
: È un altro nome della fisica delle particelle, dovuto al fatto che gran parte di questa branca della fisica si fonda su esperimenti che richiedono fasci ad alte energie.

Antiparticella
: A ogni particella è associata un'antiparticella, ossia una particella con la stessa massa ma con tutte le cariche opposte. Una particella priva di cariche, per esempio il fotone, è l'antiparticella di se stessa. Spesso l'antiparticella viene denotata con un trattino scritto sopra il simbolo della particella: per esempio $\bar{e}$ (e soprassegnato) è l'antiparticella dell'elettrone (chiamata anche positrone).

Atomo
: Un atomo ha un nucleo circondato da elettroni, legati ad esso dalla forza elettromagnetica. In natura sono presenti novantadue atomi di-

versi, corrispondenti ai novantadue elementi chimici. Il diametro di un atomo è circa 10.000 volte maggiore di quello del suo nucleo.

Barione

Un barione è una particella composta, formata da tre quark, presi a piacere sui sei. Protoni e neutroni sono barioni.

Barionica, asimmetria

Pare che il nostro universo sia fatto di barioni ma non anche di antibarioni, cosicché si riscontra un'« asimmetria ». Esistono varie idee per spiegare come sia possibile che un universo inizialmente simmetrico, con un ugual numero di protoni e antiprotoni, possa evolversi in un universo asimmetrico come quello attuale, con un miliardo di protoni circa per ogni antiprotone. Questa è un'area di ricerca molto attiva.

Big bang

Vari tipi convincenti di prove ci inducono a credere che il nostro universo abbia avuto inizio sotto forma di un denso gas di particelle, in continua espansione da allora; in altri termini, il nostro universo avrebbe avuto inizio in un « big bang caldo ».

Bosone

Sono bosoni tutte le particelle portatrici di un'unità intera di spin (0, 1, ...). Essi hanno proprietà diverse rispetto alle particelle con spin semintero (fermioni). In fisica delle particelle il « bosone » ha anche un uso più specifico: i bosoni (fotoni, gluoni, particelle *W* e *Z*) sono i quanti dei campi elettromagnetico, forte e debole. Essi trasmettono gli effetti delle forze fra quark, leptoni e se stessi. I bosoni di Higgs o higgsoni sono i quanti di un ipotetico campo di Higgs; essi non sono ancora stati scoperti.

Bosone di gauge

Le interazioni forte, elettromagnetica e debole si trasmettono attraverso lo scambio di particelle chiamate bosoni di gauge (gluoni, fotoni e particelle *W* e *Z*). I bosoni di gauge sono i quanti dei campi forte, elettromagnetico e debole.

Bosone di Higgs

Il bosone di Higgs è il quanto del campo di Higgs. Nel collisore LEP del CERN, o in altri collisori potenziati o futuri, sarà possibile produrre e scoprire bosoni di Higgs, se essi sono abbastanza leggeri. *Vedi* Campo di Higgs.

Campi, teoria quantistica dei

Si usano i metodi della teoria quantistica dei campi quando si descrivono le interazioni fra particelle come trasmesse attraverso lo scambio di bosoni.

Campo

Ogni particella è l'origine di vari campi, uno per ogni carica non nulla di cui essa è portatrice. Si hanno interazioni quando una particella sente il campo di un'altra particella. Ci sono campi elettromagnetici, campi deboli e campi di colore (o forti). Qualsiasi particella dotata di energia (compresa la massa) crea un campo gravitazionale. Nella teoria standard le particelle acquistano massa interagendo con un campo di Higgs, ma l'origine di un tale campo non è ancora compresa.

Campo di Higgs

Nella teoria standard si pensa che le particelle (bosoni e fermioni) ottengano una massa interagendo col campo di Higgs. Questo deve avere proprietà molto speciali perché le masse possano essere incluse nella teoria in un modo coerente. Gli altri campi che conosciamo derivano da particelle portatrici di cariche, ma noi non comprendiamo in che modo potrebbe avere origine il campo di Higgs; ecco perché i fisici considerano con tanta apprensione la fisica di Higgs e non concordano ancora fra loro sull'esistenza o meno del bosone di Higgs. *Vedi anche* Higgs, meccanismo di.

Carica: elettrica, di colore, debole

Ogni particella può essere portatrice di vari tipi di carica, i quali determinano in che modo essa interagisca con altre particelle. La carica elettrica è il tipo più familiare. Le particelle possono avere carica positiva o negativa o essere prive di carica. La carica di colore e la carica debole non ci sono familiari perché i loro effetti possono essere percepiti solo a distanze inferiori alla grandezza di un nucleo. Una particella non può avere quantità arbitrarie di carica, ma sono permesse solo certe quantità discrete. La misura in cui una particella sente ciascuna forza è proporzionale alla carica ad essa associata. Quark e gluoni sono portatori di cariche di colore; quark e leptoni, e i bosoni *W* e *Z*, sono portatori di cariche deboli.

Collisore di elettroni (abbreviazione per collisore di elettroni-positroni)

Un modo importante per studiare le interazioni di particelle e per cercare nuove particelle è quello di accelerare un elettrone e un positrone ad alte energie e poi farli entrare in collisione fra loro, usando un rivelatore per studiare che cosa ne emerga. L'energia a cui le particelle sono accelerate è scelta in modo tale che il fenomeno che ne risulta possa rispondere alle domande che interessano. Per esempio, per studiare la violazione *CP* in decadimenti *b* si sceglie l'energia in modo da massimizzare in modo appropriato la produzione di quark *b*, mentre per produrre nuove particelle l'energia dev'essere il più possibile grande. Tutti gli usi dei collisori di elettroni richiedono una luminosità (intensità) molto grande.

Collisore lineare di elettroni

Le particelle che si muovono su una traiettoria curva irraggiano fotoni, che trasportano via parte della loro energia. Per particelle più leggere ciò accade in misura maggiore che per particelle più pesanti. Per gli elettroni usati nel collisore LEP del CERN questa perdita di energia è molto grande, cosicché è improbabile che in futuro si continuino a

costruire collisori circolari. Ci si attende quindi che il prossimo collisore di elettroni (NLC, per Next Linear Collider) sia un collisore lineare, sul modello del primo collisore lineare, l'SLC allo SLAC.

Colore, campo di
Una particella dotata di una carica di colore è immersa in un campo di colore generato da tale carica. Qualsiasi altra particella portatrice di una carica di colore sente tale campo e interagisce con la prima particella.

Colore, carica di
Vedi Carica.

Colore, forza di
È la forza che opera fra due particelle portatrici di carica di colore. La forza di colore (o forza forte) lega i quark all'interno di protoni e neutroni. La forza di colore residua fuori dei protoni e dei neutroni è la forza nucleare che lega protoni e neutroni nei nuclei. La forza di colore è mediata dallo scambio di gluoni.

Composto
Qualsiasi oggetto formato da altri oggetti è composto. Sono perciò composti gli atomi, i nuclei e i protoni. Se quark e leptoni avessero seguito la tendenza storica secondo la quale ogni livello della materia è risultato essere formato da componenti minori, gli esperimenti ci avrebbero già offerto prove della loro natura composta. Questo fatto, combinato con argomentazioni teoriche, suggerisce che quark e leptoni potrebbero essere i componenti ultimi della materia, gli « atomi » indivisibili dei greci.

Comprensione dei dati e dei meccanismi
Per poter andare oltre una semplice comprensione descrittiva è necessario saper calcolare i valori di quantità che di solito sono semplicemente date, essendo introdotte nella teoria da fuori (come le masse), e capire per esempio quali soluzioni di equazioni descrivano effettivamente il nostro mondo. *Vedi* il capitolo 7.

Comprensione descrittiva
È così chiamata una comprensione della natura che descrive come funzionano le cose e che può spiegare dati sperimentali per le interazioni di particelle, anche se non necessariamente le proprietà di particelle. *Vedi* il capitolo 7.

Comprensione del perché
Per conseguire una « comprensione del perché » della natura si richiede, oltre a una descrizione completa (una comprensione descrittiva) e alla capacità di derivare i valori di masse e di altre quantità richieste per la descrizione (comprensione dei dati), nonché quella di saper riconoscere quali soluzioni di equazioni descrivano la natura in presenza di possibilità alternative (comprensione dei meccanismi), anche una conoscenza del perché le forze sono ciò che sono, che cosa sono i quark e i leptoni, e altre cose ancora. La comprensione del perché è l'obiettivo della maggior parte dei fisici delle particelle. *Vedi* Teoria primaria.

Cosmici, raggi
Protoni e nuclei espulsi da stelle, specialmente nel corso di esplosioni di supernovae, si muovono nello spazio cosmico, investendo la Terra da ogni direzione. Noti come raggi cosmici, o radiazione cosmica, entrano di solito in collisione con nuclei di atomi nell'atmosfera, producendo particelle « secondarie », fra cui principalmente elettroni, muoni, pioni ecc. Varie particelle dei raggi cosmici attraversano il nostro corpo ogni secondo, e possono interagire nei rivelatori e imitare segnali interessanti, cosicché è necessario schermare i rivelatori contro di esse o essere in grado di riconoscerle, in modo da non considerarle erroneamente come segnali della nuova fisica.

CP, violazione
Le interazioni di quark, leptoni e bosoni sono di norma invarianti rispetto a un'operazione di simmetria chiamata *CP*, la quale riunisce le operazioni combinate della « parità » e della « coniugazione di carica ». Si osserva una piccola violazione di quest'invarianza, che potrebbe avere importanti implicazioni. *Vedi* l'Appendice C.

Decadimento
I quark, i leptoni e i bosoni, che sono le particelle della teoria standard, hanno interazioni che permettono loro di compiere transizioni l'uno nell'altro. Ogni volta che uno di essi può trasformarsi in particelle più leggere, la transizione avverrà con una certa probabilità, e noi diciamo che la particella più pesante è instabile ed è decaduta in quelle più leggere. Nella teoria standard il quark su, l'elettrone e i neutrini non decadono; decadono invece gli altri fermioni e le particelle *W* e *Z*.

Decadimento del protone
Vedi Protone, decadimento del.

Decadimento radioattivo
Alcuni nuclei sono instabili, ma vivono abbastanza a lungo da esistere sotto forma di materia fino al loro decadimento. Quando decadono, possono emettere varie particelle: fotoni, elettroni, positroni, neutrini, neutroni e persino nuclei di elio. Per ragioni storiche tale processo fu chiamato « decadimento radioattivo ». A volte gli scienziati usano le particelle emesse come strumenti per compiere esperimenti.

Deutone
Un deutone, composto da un neutrone e un protone legati insieme dalla forza nucleare, è il nucleo più leggero dopo quello dell'idrogeno (formato da un solo protone). L'atomo di deuterio è formato da un deutone e da un elettrone orbitante attorno ad esso (l'elettrone è uno solo perché c'è un solo protone).

Dirac, equazione di
L'equazione di Dirac include nella descrizione del comportamento dei

fermioni le richieste sia della teoria quantistica sia della relatività ristretta. Essa richiede che i fermioni abbiano la proprietà detta spin, e prevede l'esistenza di antiparticelle. Fu scritta da Paul Dirac nel 1928.

Elementi chimici

Da neutroni e protoni legati assieme possono formarsi novantadue nuclei stabili diversi. Ogni nucleo forma un atomo legando a sé un numero di elettroni uguale a quello dei suoi protoni (così il nucleo è elettricamente neutro). Si ottengono in questo modo novantadue atomi diversi. Questi atomi sono le unità più piccole ancora riconoscibili dei novantadue elementi chimici.

Elettrodebole, angolo dell'unificazione

L'angolo dell'unificazione elettrodebole, θ_w, compare nella descrizione unificata delle forze debole ed elettromagnetica, fondamentalmente nell'atto di definire quale tipo di bosone sia il fotone. Una delle ragioni per cui molti fisici delle particelle credono che la teoria standard sarà estesa è che θ_w è un parametro che, mentre dev'essere misurato nella teoria standard, può essere predetto in alcune grandi teorie supersimmetriche unificate.

Elettrodebole, forza

Vedi Forza elettrodebole.

Elettrone

È una particella fondamentale. Per le sue proprietà *vedi* la tabella 4.1.

Elio, abbondanza dell'

Raffreddandosi progressivamente dopo il big bang, l'universo raggiunse a un certo punto (un minuto circa dopo l'inizio) uno stadio in cui cominciarono a formarsi protoni e neutroni, e poi i nuclei. In quelle circostanze potevano formarsi i nuclei fino all'elio, dato che le collisioni non avevano sufficiente energia per determinare la formazione di nuclei più pesanti. La teoria del big bang permette di predire la frazione di nuclei di elio prodotti, frazione che può essere misurata; le quantità osservate concordano molto bene con le previsioni della teoria. Questa è una delle ragioni principali per cui in generale si crede che l'universo abbia avuto inizio in un big bang caldo.

Famiglie

Quark e leptoni si presentano in tre famiglie (figura 4.1). L'universo accessibile alla nostra osservazione è composto dalla prima famiglia (i quark su e giù, l'elettrone e il suo neutrino). Le altre famiglie differiscono dalla prima solo per il fatto che le loro antiparticelle sono più pesanti. Noi non comprendiamo ancora perché ci siano tre famiglie.

Fasci di particelle

Un modo per imparare qualcosa sulle particelle consiste nel farle entrare in collisione e osservare che cosa accade. Si possono produrre fasci di elettroni e protoni facendo urtare violentemente fra loro atomi di idrogeno; le particelle così prodotte vengono poi fortemente accelerate mediante l'applicazione di campi elettrici. Positroni e antiprotoni non esistono in natura perché si annichilano non appena si imbattono in un elettrone o in un protone; essi possono essere prodotti colpendo un bersaglio con protoni o elettroni carichi di energia, dopo di che vengono raccolti da magneti disposti dietro il bersaglio in modo tale da mandare ogni tipo di particella su un'orbita diversamente incurvata. Fasci di particelle vengono poi accelerate ad alte energie. Quando una particella colpisce un bersaglio, viene creata con una certa probabilità ogni tipo di particella, cosicché mediante abili disposizioni di magneti e materiali possono essere prodotti altri fasci di particelle (neutroni, muoni, kaoni, neutrini ecc.).

Fermione

I fermioni sono particelle con spin semintero. Essi hanno proprietà diverse rispetto alle particelle con unità di spin intera (i bosoni). Quark e leptoni, le particelle che compongono la materia, sono fermioni.

Feynman, diagrammi di

Le regole di qualsiasi teoria quantistica dei campi possono essere formulate in modo tale che sia possibile disegnare un insieme di diagrammi che rappresentino tutti i processi che possono verificarsi, e assegnare una probabilità di occorrenza al processo rappresentato da ogni diagramma. *Vedi* l'Appendice A.

Firma

Una nuova particella avrà in un rivelatore un qualche comportamento caratteristico che permetterà di identificarla. Tutte le particelle decadranno in altre in un modo unico, diverso per ogni particella. La conoscenza delle proprietà della particella ci permette di calcolare come decadrà. I caratteri che permettono l'identificazione di una particella in un rivelatore si chiamano la sua firma.

Fisica delle particelle

Vedi Particelle, fisica delle.

Forza

Tutti i fenomeni che conosciamo in natura possono essere descritti da quattro forze: gravitazionale, debole, elettromagnetica e forte. Benché le forze debole ed elettromagnetica ci sembrino diverse, possono essere descritte in un modo più fondamentale come unificate in una forza (elettrodebole); ci sono prove che ci sia un'unificazione simile di tale forza elettrodebole con la forza forte. Il tentativo di unificare tutte le quattro forze è un'area attiva di ricerca. Nella fisica delle particelle le parole «forza» e «interazione» significano essenzialmente la stessa cosa. La forza debole è descritta nel capitolo 4.

Forza elettrodebole

Le descrizioni della forza elettromagnetica e della forza debole sono state unificate in una descrizione singola, quella della forza elettrodebole. La forza elettromagnetica e quella debole appaiono diverse per-

ché i bosoni W e Z che mediano la forza debole sono dotati di massa, mentre il fotone che media la forza elettromagnetica ne è privo; la descrizione teorica unificata elettrodebole tratta tutti i bosoni nello stesso modo.

Fotino
: È il partner supersimmetrico (tuttora ipotetico) del fotone.

Fotone
: È la particella che compone la luce. Esso trasmette la forza elettromagnetica. È il bosone di gauge dell'elettromagnetismo.

Gauge, bosone di
: *Vedi* Bosone di gauge.

Gauge, teoria di
: È una teoria quantistica dei campi nella quale le interazioni hanno luogo fra particelle portatrici di cariche, con intensità proporzionali alla grandezza delle cariche stesse, e sono trasmesse da bosoni, che sono i quanti dei campi creati dalle cariche.

Getto di adroni
: *Vedi* Gluoni come getto di adroni; Quark come getto di adroni.

Gluino
: È l'ipotetico partner supersimmetrico del gluone, da cui differisce solo per il fatto di avere spin 1/2, mentre il gluone ha spin 1, e di essere più pesante.

Gluone
: È la particella che trasmette la forza forte, il quanto del campo forte.

Gluoni come getto di adroni
: La forza di colore o forza forte è così forte che particelle dotate di colore (quark e gluoni), colpite o prodotte in una collisione, possono separarsi da altre particelle dotate di colore solo legandosi ad altre particelle colorate per formare adroni privi di colore. Così un gluone o un quark carico di energia diventa nel suo movimento uno stretto «getto» di adroni, trasformando la sua energia nella massa e nel moto di vari adroni. Un quark o un gluone appare in un rivelatore come un getto composto di norma da cinque-quindici adroni. *Vedi* Quark come getto di adroni.

Gluopalla (*glueball*)
: Si dà questo nome agli adroni formati da soli gluoni, senza alcun quark.

Grande unificazione
: È la proposta di unificare le forze debole, elettromagnetica e forte in una singola forza. Quest'unificazione, se si verifica, significa che a distanze brevissime, mille bilioni di volte minori di quelle che sono state finora studiate sperimentalmente, tali forze devono agire come un'unica forza. Le forze si comportano in modo diverso fra loro quando sono osservate su distanze maggiori.

Gravitone
: È il quanto del campo gravitazionale, e media la forza gravitazionale. Dal momento che per la teoria standard la gravità svolge essenzialmente il ruolo di una spettatrice, i gravitoni e le loro proprietà non sono discussi in questo libro.

Higgs, bosone di
: *Vedi* Bosone di Higgs.

Higgs, campo di
: *Vedi* Campo di Higgs.

Higgs, meccanismo di
: Perché bosoni e fermioni possano ricavare la loro massa dall'interazione con un campo di Higgs, ammesso che esista, si richiede uno speciale insieme di circostanze, noto come il meccanismo di Higgs. Nella teoria standard queste circostanze possono essere imposte, e in alcune estensioni della teoria standard possono essere derivate.

Infinite, quantità
: Alcune quantità che dovrebbero essere calcolabili nelle teorie quantistico-relativistiche dei campi sembrano avere valori infiniti. In passato questo è stato un problema grave nella comprensione delle teorie. Lentamente, nel corso di sessant'anni, si è imparato che una formulazione appropriata della teoria non ha quantità infinite, e oggi si sa come evitare che esse facciano la loro apparizione nelle formule. Il procedimento usato per formulare la teoria in modo da evitare la difficoltà dei valori infiniti si chiama «rinormalizzazione».

Inflazionario, universo
: *Vedi* Universo inflazionario.

Instabilità
: *Vedi* Decadimento.

Interazione
: *Vedi* Forza.

Kaone
: *Vedi* Adrone.

Laboratori nazionali
: Poiché gran parte della ricerca di fisica delle particelle dev'essere compiuta in grandi acceleratori che sono molto costosi, questi vengono costruiti come macchine di proprietà dello Stato in pochi laboratori, e vengono usati da tutti i fisici delle particelle. Questi impianti sono descritti nel capitolo 5.

Lamb, spostamento di
: È la differenza di energia fra due livelli vicini di energia di un atomo. La misurazione dello spostamento di Lamb per l'idrogeno nel 1947 stimolò i teorici a imparare come calcolarlo nonostante le quantità infinite che la teoria sembrava produrre per il suo valore, e condusse i teorici a escogitare il procedimento di rinormalizzazione.

Leptone
: I leptoni sono una classe di particelle definite da certe proprietà: sono

fermioni, con spin semintero, e non hanno carica di colore; hanno inoltre un'altra proprietà, il cosiddetto numero leptonico, che è diverso per ogni famiglia. I leptoni noti sono l'elettrone, il muone, il tauone e i loro rispettivi neutrini.

Luminosità

Qualsiasi collisore ha due valori fondamentali di merito: l'energia massima che può fornire alle collisioni, e la frequenza con la quale può causare il prodursi di collisioni. Il numero di eventi che si verificano in un collisore in un periodo di tempo dato è il prodotto di due fattori: la probabilità che, in una collisione di due particelle, accada qualcosa, e il numero di collisioni. Quest'ultimo è una proprietà solo del collisore, non della fisica che governa la collisione, e si chiama luminosità. Questa dipende da fattori come il numero di particelle che possono essere accelerate, la compattezza che si riesce a dare al fascio e via dicendo.

Massa

La massa è una proprietà intrinseca di un qualsiasi oggetto, e misura quanto sia difficile farlo muovere. Può essere assimilata al peso, anche se non è del tutto la stessa cosa; infatti la massa di un oggetto trasportato su un altro pianeta non cambia, mentre il peso sì.

Materia

È utile pensare quark e leptoni come le particelle fondamentali che compongono tutte le cose che ci circondano, e i fotoni e i gluoni che li legano come i quanti dei campi. Chiamiamo perciò i quark e i leptoni particelle materiali. A volte quest'espressione è usata per designare i fermioni.

Materia oscura

Le teorie della fisica delle particelle che estendono la teoria standard predicono varie forme di materia che potrebbero esistere oggi in grandi quantità in tutto l'universo, e che costituiscono la maggior parte della materia dell'universo stesso. Alcune particelle si muovono lentamente e sono chiamate «materia oscura fredda», mentre altre si muovono velocemente e sono chiamate «materia oscura calda». Lo studio dei moti di galassie e della formazione degli ammassi di galassie suggerisce che tale materia oscura esista, affermazione che trova conforto anche in argomentazioni teoriche cosmologiche. *Vedi anche* Materia oscura fredda.

Materia oscura calda

Vedi Materia oscura.

Materia oscura fredda

Spesso le teorie di fisica delle particelle che estendono la teoria standard predicono l'esistenza di nuove particelle stabili che sarebbero state presenti nel primissimo universo e che sarebbero sopravvissute fino a oggi, formando una grande frazione della materia dell'universo attuale. Queste particelle interagirebbero debolmente e avrebbero di solito una grande massa, cosicché si muoverebbero lentamente: sarebbero quindi «fredde». Un possibile esempio di una tale particella è il partner supersimmetrico più leggero. Gli astronomi hanno prove dell'esistenza della materia oscura fredda dal moto della Galassia e dalla struttura su grande scala dell'universo.

Maxwell, le equazioni di

L'elettromagnetismo – la teoria unificata di tutti i fenomeni elettrici e magnetici – è compendiato in un insieme di equazioni, la prima delle quali fu scritta da James Clerk Maxwell negli anni '60 dell'Ottocento. Quando si amplia tale insieme a comprendere gli effetti della teoria quantistica, si ottiene l'elettrodinamica quantistica. Gli studenti universitari di fisica impiegano per due anni un quarto circa del loro tempo a imparare a risolvere le equazioni di Maxwell, a meno che non intendano lavorare in una branca della fisica che faccia largo uso di tali equazioni, nel qual caso dedicano al loro studio un tempo molto maggiore.

Mediare

Gli effetti delle interazioni vengono trasmessi da una particella a un'altra per mezzo dello scambio di particelle dette bosoni. Si dice che i bosoni mediano l'interazione o forza.

Mesone

Vedi Adrone.

Microonde, radiazione di fondo a

Vedi Radiazione di fondo a microonde.

Modello standard

La teoria di grandissima efficacia dei quark e dei leptoni, e delle loro interazioni, che è descritta in questo libro, è chiamata dai fisici delle particelle «modello standard». Questo nome ha avuto origine storicamente agli inizi dello sviluppo della teoria, e proprio il suo uso pressoché universale, dovuto al grande successo della teoria, rende difficile cambiarlo. Poiché il modello standard è la teoria matematica più completa che sia mai stata sviluppata, ed è ben confermata sperimentalmente, in questo libro l'ho chiamata «teoria standard».

Molecole

Benché gli atomi siano elettricamente neutri, le cariche positive e negative non coincidono spazialmente, cosicché all'esterno di un atomo c'è un certo campo elettrico (*vedi* la figura 4.2). Grazie ad esso gli atomi possono attrarsi e formare molecole, le quali possono diventare molto grandi.

Muone

È una particella fondamentale. Per le sue proprietà *vedi* la tabella 4.1. Un muone decade, formando un elettrone e un paio di neutrini, entro un milionesimo di secondo circa. I muoni hanno origine in collisioni negli acceleratori, nel decadimento di altre particelle prodotte negli acceleratori e nelle collisioni delle particelle dei raggi cosmici.

Neutrini solari

Le reazioni che forniscono energia al Sole conducono all'emissione di fotoni, che raggiungono la superficie della Terra sotto forma di luce solare, e di neutrini, che non vediamo con i nostri occhi, ma che possono essere scoperti da speciali rivelatori. Attualmente c'è molto interesse per queste particelle perché ne vengono scoperte in misura minore rispetto alle attese; questo potrebbe essere infatti un segnale del fatto che i neutrini hanno una massa, nel qual caso si potrebbe spiegare perché siano meno del previsto. Se hanno una massa, gli esperimenti per rivelarli permetteranno di misurarne il valore.

Neutrino

È una particella fondamentale. Per le sue proprietà *vedi* la tabella 4.1. Esiste un neutrino distinto per ognuna delle tre famiglie.

Neutrone

Vedi Adrone. Un neutrone libero ha una durata di vita di circa 15 minuti, dopo di che decade in un protone, un elettrone e un antineutrino; quando i neutroni sono legati in nuclei (come negli atomi che formano il nostro corpo) il decadimento non è più possibile a causa di sottili effetti spiegati dalla teoria quantistica, cosicché all'interno dei nuclei i neutroni sono stabili come i protoni.

Newton, costante G di

La legge di gravitazione di Newton dice che la forza gravitazionale che si esercita fra due corpi è direttamente proporzionale al prodotto delle loro masse e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza. Quest'asserzione viene trasformata in un'equazione introducendo in essa la costante G, cosicché la forza è $F = Gmm'/r^2$.

Newton, leggi di

Newton scrisse la legge che descrive la forza gravitazionale (*vedi* Newton, costante G di) e le tre leggi che descrivono il moto. La prima legge dice che ogni corpo in movimento tende a muoversi di moto rettilineo uniforme fino a quando una forza non agisce su di esso; la seconda dice che il prodotto della massa di un corpo per la sua accelerazione è uguale alla forza che agisce su di esso ($F = ma$), e la terza dice che, se un corpo applica una forza a un secondo corpo, questo applica a sua volta al primo una forza uguale di direzione opposta (principio di azione e reazione).

Nucleo

Benché protoni e neutroni siano particelle prive di colore composte da quark e gluoni, il fatto che quark e gluoni non coincidano spazialmente ha come conseguenza che una parte dei loro campi di colore si estenda fuori dei protoni e dei neutroni. Questa parte esterna del campo di colore esercita una forza di attrazione che lega insieme tali particelle composte nel nucleo atomico. Gli effetti attrattivi di questa forza di colore residua sono annullati dalla repulsione elettrica dei protoni, cosicché non possono esistere nuclei con un numero di protoni troppo elevato. Risulta così che in natura ci sono novantadue nuclei stabili o di lunga vita: sono i nuclei degli atomi dei novantadue elementi chimici.

Particella

La parola «particella» è usata a volte in un modo un po' libero, per designare non solo particelle elementari come quark, leptoni e bosoni, ma anche particelle composte come gli adroni. Essa comprende anche le nuove particelle (attualmente ipotetiche) che potrebbero essere scoperte, come i partner supersimmetrici dei quark, dei leptoni e dei bosoni.

Particella subatomica

Qualunque particella sia contenuta in un atomo – come protoni, neutroni e elettroni – o qualunque particella possa essere creata in collisioni di tali particelle viene chiamata genericamente «subatomica», tanto se è composta, come un protone, quanto se è elementare, come un quark o un elettrone.

Particelle, fisica delle

È il campo della fisica che studia le particelle e cerca di capirne il comportamento e le proprietà. A volte si distingue fra la fisica delle particelle – che studia i quark, i leptoni, i bosoni di gauge e la fisica di Higgs – e lo studio della fisica degli adroni, che mira a correlare le proprietà degli adroni alla teoria della forza di colore.

Pione

È l'adrone più leggero, ed è perciò quello che si produce più spesso nelle collisioni.

Planck, costante h di

Nella teoria quantistica molte cose sono quantizzate, come per esempio i livelli di energia dell'atomo. La costante di Planck h fissa la scala della quantizzazione: i vari livelli di energia sono separati da quantità proporzionali a h; la quantità di spin che una particella può avere è un multiplo di h e via dicendo.

Planck, scala di

Noi misuriamo tutte le cose in unità. La costante di Newton G, la costante di Planck h e la velocità della luce c sono tre quantità che possono essere combinate in vari modi a formare tutte le unità possibili. Il nostro modo naturale di scegliere unità ci induce a scegliere unità piccole ma di cui abbiamo esperienza diretta, come centimetri, secondi ecc. Se ci si chiede quali sarebbero le unità naturali per un universo che ignorasse l'uomo, la risposta è che sarebbero probabilmente le unità formate da G, h e c, le quali ci danno le scale naturali dell'universo stesso. Per il tempo l'unità che ne risulta è di circa 10^{-43} secondi, e per la distanza di circa 10^{-34} cm. Queste unità sono chiamate tempo di Planck e distanza di Planck perché la loro pertinenza fu discussa per la prima volta da Max Planck.

Positrone o positone

È l'antiparticella dell'elettrone.

Predire

Il verbo «predire» (o prevedere) è usato normalmente nel senso che una teoria potrebbe prevedere un qualche risultato imprevisto o non ancora misurato. Esso è usato però anche in un altro senso: si può dire anche che una teoria predice un risultato che è già noto, in quanto la teoria, una volta scritta, fornisce un'enunciazione unica su quel risultato. A volte si verifica una situazione intermedia, nel senso che la teoria può predire un risultato in via puramente teorica, fondandosi però sulla conoscenza di quantità ottenute per altra via.

Proibito

Si dice proibito qualsiasi processo di cui si possa immaginare ingenuamente la possibilità, ma che non dovrebbe verificarsi secondo le previsioni della teoria standard. Il presentarsi o no di questi processi può essere considerato un test della teoria standard. Se essi si producessero con lo stesso ritmo di altri processi, la teoria standard sarebbe sbagliata; qualora invece avessero luogo a un ritmo molto minore, o non si producessero affatto, ci fornirebbero un indizio circa il modo in cui estendere la teoria standard.

Proiettili

Per studiare le particelle e le loro interazioni è necessario scandagliarle con proiettili. Allo scopo si usano altre particelle: elettroni, fotoni, neutrini e protoni. La scelta di questi «proiettili» è dovuta al fatto che queste particelle sono le uniche cose abbastanza piccole e in grado di ricevere abbastanza energia per permetterci di imparare qualcosa sulle particelle stesse.

Protone

Vedi Adrone.

Protone, decadimento del

Se la teoria standard fosse la descrizione completa e definitiva della natura, i protoni sarebbero stabili, non decadendo mai. Se invece la teoria standard è una parte di una teoria più generale che unifica quark e leptoni, probabilmente i protoni sono instabili, pur avendo una durata di vita estremamente lunga. Gli esperimenti che cercano di rivelare il decadimento del protone sono molto importanti perché, se noi sapessimo con certezza che si è già verificato (e in che cosa il protone decade), disporremmo di informazioni preziose su come estendere la teoria standard.

Puntiforme

Se si scandaglia la materia con proiettili di dimensioni relativamente grandi e dotati di un'energia inferiore a quella necessaria per cambiare i livelli di energia di un atomo, gli atomi sembreranno oggetti puntiformi. Accrescendo l'energia, il proiettile penetrerà nell'atomo ma si

imbatterà nel nucleo, che sembra a sua volta puntiforme. Al crescere dell'energia dei proiettili, anche il nucleo si rivelerà però un oggetto composto, formato da particelle puntiformi, i protoni e i neutroni, i quali risulteranno poi a loro volta composti da quark e gluoni. Era prevedibile che anche questi sarebbero infine risultati composti da qualcosa di ancora più piccolo, ma così non è stato. Essi hanno infatti continuato a comportarsi da particelle puntiformi alle massime energie con cui sono stati esaminati: energie molto superiori a quelle alle quali ci saremmo attesi di trovare nuovi componenti se la storia avesse dovuto ripetersi.

Quantistica, teoria

La teoria quantistica fornisce le regole per calcolare come si comporta la materia a ogni livello. Una volta che gli scienziati abbiano specificato quale sistema vogliono descrivere, e quali siano le interazioni fra le particelle del sistema, si risolvono le equazioni della teoria quantistica per apprendere le proprietà del sistema.

Quanto

Ogni particella è circondata da un campo per ciascuno dei tipi di carica di cui è portatrice, come il campo elettromagnetico se ha una carica elettrica. Nella teoria quantistica un campo è descritto come composto da bosoni, che sono i quanti del campo. In senso meno formale, un quanto è la quantità più piccola che possa esistere di qualcosa.

Quark

È una particella fondamentale. Per un elenco dei quark e per le loro proprietà *vedi* la tabella 4.1.

Quark come getto di adroni

Poiché i quark possono esistere solo all'interno di adroni, quelli che emergono da collisioni o che sono prodotti appaiono nei rivelatori nella forma di un sottile getto di adroni, per lo più pioni. *Vedi anche* Gluoni come getto di adroni.

Quark *b*, fabbrica di

Una fabbrica di quark *b* è un impianto destinato a produrre e scoprire un gran numero di quark *b*, almeno 100 milioni all'anno. Saranno fabbriche di quark *b* i collisori di elettroni e positroni progettati, ma potrebbe essere utile anche un collisore di protoni, purché si riuscisse a costruire un rivelatore appropriato. Il loro obiettivo principale è lo studio della violazione *CP*.

Radiazione di fondo a microonde

Durante l'espansione e il raffreddamento dell'universo, le particelle originarie andarono via via decadendo e annichilandosi fino a lasciare solo fotoni, neutrini, e i protoni, neutroni ed elettroni che formarono gli atomi. Oggi c'è un gas freddo di fotoni, 400 circa per ogni centimetro cubico di universo, chiamato radiazione di fondo a microonde perché la lunghezza d'onda dei fotoni si trova nella regione delle microonde.

Radioattivo, decadimento
Vedi Decadimento radioattivo.

Relatività ristretta
I vincoli della relatività ristretta sono due condizioni che, come sottolineò Einstein, dovrebbero essere soddisfatte da una qualsiasi teoria fisica accettabile. Semplificando molto, tali condizioni sono: 1) che nessuna particella può muoversi a una velocità superiore a quella della luce nel vuoto; 2) che scienziati che lavorano in diversi laboratori in moto con velocità relative diverse dovrebbero trovare le stesse leggi naturali. I vincoli imposti da queste condizioni hanno implicazioni sorprendenti per la struttura di teorie accettabili. Per esempio, l'equazione di Schrödinger della teoria quantistica non soddisfa queste condizioni. Quando però essa fu generalizzata in modo che le soddisfacesse, l'equazione risultante condusse alla previsione delle antiparticelle, la cui esistenza non era affatto necessaria dal punto di vista della sola teoria quantistica.

Riduzionismo
Un modo per studiare l'universo naturale è quello di esaminare aspetti molto dettagliati della natura, di scomporre le cose e vedere di che cosa sono fatte, e di concentrarsi ogni volta su un piccolo passo. Questa impostazione viene definita « riduzionistica ». Essa ha avuto un successo grandissimo, permettendoci di costruire la visione notevolmente completa della natura che possediamo oggi. Ogni volta che ne hanno avuto la possibilità, gli scienziati hanno tentato di unificare ciò che si conosceva. Recentemente in fisica delle particelle la tendenza all'unificazione ha avuto un crescente successo.

Rinormalizzazione
Vedi Infinite, quantità.

Rivelatore
Si studiano le proprietà delle particelle osservandone le interazioni e i decadimenti. Queste osservazioni vengono compiute con i rivelatori, i quali possono essere concepiti come macchine fotografiche che registrano informazioni in vari modi, non solo su pellicola. Per permetterci di apprendere qualcosa sulle interazioni che sono in primo piano nei problemi di oggi, i rivelatori devono essere molto grandi e devono usare (e sovente anche sviluppare) tecnologie migliori. In ogni esperimento di fisica delle particelle si usano uno o più rivelatori.

Rottura spontanea della simmetria
Vedi Simmetria, rottura spontanea della.

Scienza
La scienza può essere definita un modo autocorrettivo di procurarsi conoscenze sull'universo naturale, più il corpus di conoscenze in tal modo ottenuto: è sia un metodo sia la comprensione e conoscenza risultanti. Il metodo richiede la creazione di modelli per spiegare i fenomeni, la loro verifica sperimentale e la loro correzione fino a quando non funzionino. L'obiettivo della scienza è la comprensione. Una volta compresa una parte del mondo naturale, può diventare possibile lo sviluppo di applicazioni della nuova conoscenza. Lo sviluppo di tali applicazioni è chiamato propriamente tecnologia, non scienza. Benché la conoscenza scientifica possa condurre alla tecnologia – e a volte effettivamente ciò avviene – la scienza non è indispensabile per la tecnologia, e a volte è accaduto che siano stati taluni sviluppi tecnologici a condurre a una nuova scienza, oltre che l'inverso. Prima del tempo di Galileo si sono verificati molti sviluppi tecnologici che non avevano alcuna connessione con la scienza. Dal tempo di Maxwell e dei suoi scritti sulla teoria elettromagnetica in poi, quasi tutti gli sviluppi tecnologici sono dipesi da anteriori sviluppi scientifici. In anni recenti le parole « scienza » e « tecnologia » sono state spesso usate impropriamente come se fossero intercambiabili.

Selettrone
È il partner supersimmetrico dell'elettrone.

Simmetria, rottura spontanea della
Accade spesso che le equazioni di una teoria abbiano certe simmetrie, ma le loro soluzioni no. Per esempio, le equazioni possono descrivere varie particelle in modi identici, mentre le soluzioni possono assegnare alle particelle proprietà diverse. Nel libro si danno alcuni esempi, particolarmente nel capitolo 7. Quando ciò si verifica in certe condizioni, si parla di rottura spontanea della simmetria.

Sleptone
È un superpartner di un qualsiasi leptone.

Sparticella
È un superpartner di qualsiasi particella.

Spettri
Gli atomi possono esistere in vari livelli di energia discreti, e quando compiono transizioni da un livello all'altro emettono o assorbono fotoni. Le energie dei fotoni emessi o assorbiti da un atomo sono diverse da quelle di ogni altro atomo. Le energie dei fotoni sono connesse direttamente alle loro frequenze, le quali fissano i relativi colori, cosicché osservando il colore dei fotoni è possibile determinare quali atomi vengano osservati. Quest'identificazione può essere fatta in laboratorio, ma anche nel caso della luce proveniente da stelle, vicine o lontane, possiamo identificare gli atomi da cui essa emana, e quindi determinare la composizione delle stelle. In tutto l'universo si possono osservare solo gli stessi novantadue elementi che troviamo sulla Terra.

Spin
Lo spin è una proprietà posseduta da tutte le particelle. È come se le particelle fossero sempre in rotazione a una velocità fissa (che potrebbe anche essere zero). Tale velocità può essere diversa a seconda del tipo

di particella, ma non può mai essere del tutto identica perché le particelle non devono avere necessariamente un'estensione spaziale per avere uno spin. La teoria quantistica richiede che lo spin sia presente sempre in quantità definite; se l'unità scelta è la costante di Planck h divisa per 2π, le particelle possono avere spin zero, spin 1/2, spin 1 e via dicendo.

Squark
È il superpartner di qualsiasi quark.

Struttura
Gli oggetti hanno una struttura se hanno parti: cioè se sono composti da altre cose. Se un oggetto abbia o no una struttura lo si può accertare per mezzo di esperimenti che lo scandaglino con proiettili. Nel corso dell'ultimo secolo ogni stadio della materia trovato ogni qualvolta divenne possibile investigare oggetti più piccoli risultò avere una struttura. Quark e leptoni non sembrano avere una struttura, cosicché la ricerca di componenti elementari potrebbe essere giunta alla sua conclusione.

Supercorde
Vedi Superstringhe.

Superpartner
Se la teoria che descrive la natura ha una simmetria chiamata supersimmetria, allora ogni particella normale (quelle che conosciamo) ha, associato a sé, un partner supersimmetrico che differisce da essa solo per spin e per massa.

Supersimmetria
È un'ipotetica simmetria della teoria che descrive la natura. Essa dice che, anche se fermioni e bosoni ci sembrano molto diversi nelle loro proprietà e nei loro ruoli, nella teoria stessa essi appaiono in un modo simmetrico. Se la supersimmetria è effettivamente realizzata in natura, ogni particella ha un superpartner.

Superstringhe o supercorde
Gli esperimenti suggeriscono che quark e leptoni non abbiano grandezza o struttura, e la teoria attuale li rappresenta come sorgenti puntiformi di campi quantici. Le teorie delle superstringhe dicono che le particelle dovrebbero essere rappresentate come stringhe, probabilmente come cappi chiusi, più che come punti, ma così piccole da non essere osservabili direttamente in esperimenti. La descrizione attuale sarebbe un modo valido per fornire una descrizione approssimata delle particelle alle distanze che possono essere scandagliate in esperimenti. I proponenti delle teorie delle superstringhe sostengono che esse potrebbero raggiungere quella che abbiamo chiamato una comprensione del perché.

Tecnologia
Vedi Scienza.

Teoria
La parola «teoria» è usata di solito in fisica in un modo molto preciso. Le teorie sono insiemi di equazioni le cui soluzioni descrivono sistemi fisici e loro comportamenti. Una descrizione più articolata delle proprietà di una teoria è data nel capitolo 1.

Teoria di tutto
Una «teoria di tutto» non dovrebbe solo descrivere come funzionino le cose ma dovrebbe anche spiegare perché sono come sono. In questo libro la nostra comprensione presente è chiamata comprensione descrittiva. Una teoria di tutto richiederebbe in aggiunta ad essa una comprensione dei dati e dei meccanismi e una comprensione del perché. Il nome «teoria di tutto» è in un certo senso poco felice, perché una tale teoria non ci direbbe come dedurre il comportamento di sistemi complessi da una conoscenza dei loro componenti. In questo libro io ho preferito usare l'espressione «teoria primaria» (*vedi*).

Teoria primaria
È il nome che ho usato in questo libro per designare la teoria cercata da molti fisici delle particelle, la quale dovrebbe comprendere non solo la teoria standard ma anche la teoria della gravità, e spiegare perché la teoria assuma la forma che assume, e che cosa siano i quark e altre particelle, lo spazio e il tempo e altre cose ancora. Conoscendo la teoria primaria, avremmo una comprensione del perché. *Vedi* Teoria di tutto.

Teoria quantistica
Vedi Quantistica, teoria.

Teoria quantistica dei campi
Vedi Campi, teoria quantistica dei.

Teoria standard
Vedi Modello standard.

Trasmettere
Vedi Mediare.

Unificazione
Per secoli gli scienziati hanno cercato di unificare le descrizioni di fenomeni apparentemente diversi mostrando che erano dovuti alle stesse leggi naturali sottostanti, e che livelli complessi di materia erano composti da livelli più semplici. Questo processo di unificazione è oggi oggetto di una ricerca molto attiva nello studio delle forze della natura. La possibile unificazione delle forze forte, elettromagnetica e debole è chiamata una «grande unificazione». C'è uno sforzo continuo per unificare queste forze con la gravità.

Universo inflazionario
Secondo la teoria dell'universo inflazionario, dopo il big bang l'universo passò per una fase di espansione molto rapida, chiamata «inflazione», dopo di che rallentò fino alla velocità attuale.

Universo piatto
Si dice che l'universo è piatto se la velocità della sua espansione rallenta in misura tale da diventare zero in un futuro infinitamente lontano. La velocità di espansione è determinata dalla massa totale dell'universo, poiché il rallentamento è dovuto all'autoattrazione gravitazionale. La massa presente nell'universo non è stata ancora misurata abbastanza bene da darci la certezza di averlo fatto correttamente, ma è vicina alla quantità necessaria per produrre un universo piatto. Se l'universo fosse effettivamente piatto, la maggior parte della materia in esso presente dovrebbe essere materia oscura, non composta da quark e da elettroni.

Velocità della luce
La luce e tutte le altre particelle prive di massa si propagano nel vuoto con una velocità, designata di solito con la lettera c, il cui valore è di poco meno di 300.000 km al secondo. La relatività ristretta implica che nessuna particella o nessun segnale possa muoversi a una velocità superiore a quella della luce, e che i fotoni abbiano sempre questa velocità quale che sia la velocità della loro sorgente.

Vuoto
Qualsiasi sistema fisico si dispone, se possibile, nello stato di minima energia. Nella maggior parte dei campi questo è lo stato in cui il campo è nullo, ma i teorici ipotizzano che, per il campo di Higgs, uno stato in cui il campo assuma un valore costante diverso da zero dia al sistema un'energia inferiore. Il valore del campo di Higgs in tale sistema è chiamato il suo «valore di aspettazione del vuoto».

Vuoto, valore di aspettazione del
Vedi Vuoto.

Wino
È il partner supersimmetrico del bosone *W*.

Indici

Indice analitico

Indice generale

LA LENTE DI GALILEO

Una collana
contro l'analfabetismo
matematico e scientifico

Robin Dunbar
NON SPARATE SULLA SCIENZA

«Una puntuale e coinvolgente difesa della scienza. Un libro che spiega, con esempi vividi ed efficaci, che cos'è la scienza, che cosa fa, che cosa non può fare e perché molti di noi trovano la scienza – o addirittura il pensiero logico – relativamente difficile.»
Financial Times

Robert Osserman
POESIA DELL'UNIVERSO
L'esplorazione matematica del cosmo

«Bellissimo. Il libro mostra come la matematica e la nostra comprensione dell'universo progrediscano insieme. Spiegazioni lucide e appassionate... Lo raccomando a tutti.»
George F. Smoot, astrofisico

LA LENTE DI GALILEO

Una collana
contro l'analfabetismo
matematico e scientifico

Lawrence M. Krauss
LA FISICA DI *STAR TREK*
Premessa di Stephen Hawking

« La fantascienza di oggi è spesso la scienza di domani. Vale senza dubbio la pena di indagare la fisica di *Star Trek*. Confinare la nostra attenzione a problemi terrestri sarebbe come porre limiti allo spirito umano. »
Dalla Premessa

Robert M. Hazen e James Trefil
LA SCIENZA PER TUTTI
Guida alla formazione
di una cultura scientifica di base

« Probabilmente sarà l'alfabetizzazione scientifica a determinare la possibilità di sopravvivenza della società democratica nel XXI secolo. *La scienza per tutti* è un modello di chiarezza e coerenza. Questo libro rende un servizio di incalcolabile valore. »
Leon M. Lederman, premio Nobel per la Fisica

LA LENTE DI GALILEO

Una collana
contro l'analfabetismo
matematico e scientifico

Natalie Angier
L'IMMAGINAZIONE DELLA NATURA

« Natalie Angier riesce a trarre dalla scienza un significato che spesso sfugge agli scienziati stessi e a convogliarlo in uno stile arguto, brillante e scorrevolissimo. »
David Baltimore, premio Nobel per la Medicina

Michael Guillen
LE CINQUE EQUAZIONI
CHE HANNO CAMBIATO IL MONDO

« Con la chiarezza propria dei grandi divulgatori scientifici, Michael Guillen riesce a comunicarci la potenza e la poesia del linguaggio matematico. »
The Wall Street Journal

Gordon Kane
IL GIARDINO DELLE PARTICELLE

« Questo libro si legge come una conversazione con un grande insegnante. Spiega ciò che sappiamo sulla struttura elementare della materia e le relazioni esistenti fra il mondo subatomico e la nascita del cosmo. »
Burton Richter, premio Nobel per la Fisica

sottese all'intero universo: dalle affermazioni dei filosofi greci, secondo i quali doveva esistere un elemento primario costitutivo della materia, fino alle scoperte di Newton, Maxwell, Einstein, Heisenberg. Poi, grazie a un affascinante *tour* dei maggiori laboratori di fisica nel mondo, l'autore ci mostra come gli enormi acceleratori e collisori odierni siano in grado di « vedere » cose milioni di milioni di volte più piccole di quelle osservabili attraverso i primi microscopi, quattrocento anni or sono. Così, grazie alla comprensione del funzionamento dei macchinari utilizzati per « vedere » i quark e i leptoni, riusciamo a capire meglio gli esperimenti che hanno condotto gli scienziati a formulare la cosiddetta « teoria standard », cioè la teoria matematica completa che descrive come funzionano tutte le cose, dalle particelle alle stelle, cominciando dagli elettroni e dai quark. Il punto d'arrivo della ricerca scientifica, quindi? Niente affatto, ci rivela Kane, spiegandoci come la « teoria standard » si estenda di giorno in giorno, incorporando le ricerche più avanzate sulla supersimmetria, sulla materia oscura e sulle superstringhe, e spingendosi sino a far intravedere una possibile – ed esaltante – « teoria del tutto »...

Forte di una pluriennale esperienza nell'insegnamento della fisica a studenti non specializzati, Gordon Kane ci guida con sicurezza e disinvoltura in un campo tanto ostico quanto affascinante: grazie al suo libro, destinato a diventare un piccolo classico sull'argomento, il mondo delle particelle non sarà più, per noi, un giardino proibito.

Gordon Kane è docente di fisica all'università del Michigan e membro della American Physical Society. Ha pubblicato oltre cento articoli sulla teoria delle particelle ed è un apprezzatissimo divulgatore scientifico.

LIRE
28.000 (*i.i.*)

LA LENTE DI GALILEO

Le discipline scientifiche sono guardate
da molti con timore. Un timore che i libri di
questa nuova collana di divulgazione scientifica
intendono fugare, proponendo testi
di illustri studiosi che coniugano un linguaggio
chiaro e accessibile a tutti con il rigore
della trattazione. Gli argomenti affrontati
sono molteplici e consentono ai lettori
di comprendere non solo le nozioni fondamentali
delle varie discipline, ma anche le loro nuove
frontiere e le sfide a esse legate.

ISBN 88-304-1435-

9 788830 41435

CL 043 - 84007